



Universitat de Lleida

TREBALL FINAL DE GRAU



ESCOLA
POLITÈCNICA SUPERIOR
UNIVERSITAT DE LLEIDA
INSPIRING THE FUTURE

Estudiant: MARC SALES MONTUFO

Titulació: Grau en Enginyeria Electrònica Industrial i Automàtica

Títol de Treball Final de Grau: **Caracterització tridimensional d'estructures vegetals mitjançant escaneig 3D**

Director/a: **Gabriel Pérez i Eduard Gregorio**

Presentació

Mes: Juliol

Any: 2019



ÍNDEX

Agraïments	1
Abstract	2
1. Introducció	3
2. Què és un sensor 3D?	4
2.1. Explicació	4
2.2. Història	5
2.3. Tipus de sensors 3D	5
2.3.1. Sensors 3D per contacte	6
2.3.2. Sensors 3D sense contacte actius	7
2.3.2.1. Time of Flight	7
2.3.2.2. Triangulació	8
2.3.2.3. Llum estructurada	10
2.3.2.4. Diferència de fase	11
2.3.2.5. Holografia conoscòpica	11
2.3.3. Sensors 3D sense contacte passius	12
2.3.3.1. Estereoscòpics	12
2.3.3.2. Silueta	13
2.4. Principals aplicacions	13
3. Materials i Mètodes	18
3.1. Sensors utilitzats	18
3.1.1. Intel® RealSense™ Depth Camera D435	18
3.1.2. Kinect v2	20
3.1.3. Sense™ 3D scanner	22
3.2. Softwares utilitzats	23
3.2.1. Intel® RealSense™ SDK 2.0	23
3.2.2. Kinect3D GPS	25
3.2.3. Sense™	27
3.2.4. CloudCompare	28
3.3. Part experimental	29
3.3.1. Plantes a escanejar	29
3.3.2. Metodologia d'escaneig	30
3.3.3. Comparació dels diferents sensors 3D	33

4. Resultats i discussió	34
4.1. Versatilitat i facilitat d'ús	34
4.2. Il·luminació	35
4.3. Precisió en la mesura de distàncies	40
4.4. Escaneig en exteriors	43
4.5. Comparativa general entre sensors	46
5. Conclusions	48
Bibliografia i web grafia	49

ÍNDEX DE FIGURES

Figura 1. Procés de reconstrucció d'un objecte	4
Figura 2. Principals tipus de sensors 3D	6
Figura 3. Sensor 3D per contacte	7
Figura 4. Palpador	7
Figura 5. Principi tecnològic d'un sensor 3D TOF	7
Figura 6. Sensor 3D TOF (Scan Station 2)	8
Figura 7. Principi tecnològic d'un sensor 3D per triangulació	9
Figura 8. Sensor 3D de triangulació (Ciclop B)	9
Figura 9. Principi tecnològic sensor 3D de llum estructurada	10
Figura 10. Sensor 3D de diferència de fase (FARO FocusS)	11
Figura 11. Sensor 3D de holografia conoscòpica (ConoPoint-3)	12
Figura 12. Sensor 3D estereoscòpic (Fuel 3D Scanify)	13
Figura 13. Escaneig 3D d'una peça	14
Figura 14. Maqueta feta a través d'escaneig 3D	14
Figura 15. Disseny de pròtesis amb escaneig 3D	15
Figura 16. Museu britànic digitalitzant la seva col·lecció	16
Figura 17. Digitalització de la torre Eiffel	17
Figura 18. Sensor 3D Intel® RealSense™ Depth Camera D435	18
Figura 19. Components que formen el sensor Intel® RealSense™ Depth Camera D435	20
Figura 20. Sensor 3D Kinect v2 per a Windows	20
Figura 21. Components que formen la Kinect v2	21
Figura 22. Sense™ 3D Scanner	22
Figura 23. Components del sensor Sense™ 3D Scanner	22
Figura 24. Software Intel® RealSense™ viewer: escaneig a temps real	24
Figura 25. Depth Quality Tool	24
Figura 26. Núvol de punts en format .txt	25
Figura 27. Interfície Kinect3D GPS	26
Figura 28. KinectCam Settings	26
Figura 29. Identificació d'una persona amb Sense™ 3D scanner	27
Figura 30. Núvol de punts d'un mallat	28
Figura 31. Comparació entre un núvol i un mallat	28
Figura 32. Sedum Sediforme	30
Figura 33. Escenari escaneig amb el sensor Sense™ 3D scanner	30
Figura 34.. Arxiu "vertices" del sensor Sense™ 3D scanner	31
Figura 35. Escenari per al mètode d'escaneig per al sensor d'Intel i Kinect v2	32
Figura 36. Eina "Align" de CloudCompare	32



 ESCOLA POLITÈCNICA SUPERIOR UNIVERSITAT DE LLEIDA	Títol: Caracterització tridimensional d'estructures vegetals mitjançant escaneig 3D Autor: Marc Sales Montufo
---	--

Figura 37. Escaneig sensor Kinect v2 amb llum natural	36
Figura 38. Escaneig sensor Sense™ 3D scanner amb llum natural	36
Figura 39. Escanejos del sensor Intel® RealSense™ Depth Camera D435 on es veuen afectats els colors degut a la il·luminació	37
Figura 40. Escaneig sensor Intel® RealSense™ Depth Camera D435 amb llum natural	37
Figura 41. Escaneig sensor Kinect v2 amb reforç en la il·luminació	38
Figura 42. Escaneig sensor Sense™ 3D scanner amb reforç en la il·luminació	39
Figura 43. Escaneig sensor Intel® RealSense™ Depth Camera D435 amb reforç en la il·luminació	39
Figura 44. Mesura de l'amplada de la taula amb el sensor Kinect v2	40
Figura 45. Mesura de la profunditat de la taula amb el sensor Kinect v2	41
Figura 46. Mesura de l'amplada de la taula amb el sensor d'Intel	41
Figura 47. Mesura de la profunditat de la taula amb el sensor d'Intel	42
Figura 48. Mesura de l'amplada de la caps a amb el sensor Sense™ 3D scanner	42
Figura 49. Mesura de la profunditat amb el sensor Sense™ 3D scanner	43
Figura 50. Escaneig amb el sensor Kinect v2 en l'ombra	44
Figura 51. Escaneig amb el sensor Intel® RealSense™ Depth Camera D435 en l'ombra	45
Figura 52. Escaneig amb el sensor Intel® RealSense™ Depth Camera D435 a ple sol	45
Figura 53. Escaneig amb el sensor Kinect v2 a ple sol	46

ÍNDEX DE TAULES

Taula 1. Taula d'especificacions del sensor Intel® RealSense™ Depth Camera D435	19
Taula 2. Taula d'especificacions tècniques de la Kinect v2	21
Taula 3. Taula d'especificacions tècniques Sense™ 3D Scanner	23
Taula 4. Taula comparativa dels diferents sensors 3D	47

 ESCOLA POLITÈCNICA SUPERIOR UNIVERSITAT DE LLEIDA	Títol: Caracterització tridimensional d'estructures vegetals mitjançant escaneig 3D Autor: Marc Sales Montufo
---	--


Agraïments

M'agradaria poder donar les gràcies a tota la gent que ha pogut fer possible aquest treball de final de carrera, ja sigui participant-hi directament o ajudant-me en qualsevol dubte per petit que fos.

Voldria donar les gràcies als meus dos tutors, al Gabriel i a l'Eduard, que em van proposar aquest tema i em van obrir a un món desconegut per mi, d'una banda l'ús de la vegetació en edificació, mitjançant cobertes i façanes vegetades, i de l'altra el món de l'agricultura de precisió, un món de gran importància que no descarto poder dedicar-m'hi professionalment algun dia. També els hi voldria agrair la seva atenció durant tot el procés de realització del treball, sempre ajudant-me amb qualsevol problema o dubte que tingués.

A més a més, voldria agrair tota l'ajuda prestada per l'estudiant de doctorat Jordi Gené, que va ser la persona que em va ensenyar com havia d'escanejar amb el sensor 3D Kinect v2 i em va facilitar el software d'escaneig per poder obtenir el núvol de punts. També voldria agrair-li l'ajuda a l'hora de netejar els núvols de punts, ja que em va facilitar uns codis MatLab per poder dur a terme aquesta tasca.

Finalment, voldria agrair a la meua família tota l'ajuda i suport que m'han brindat durant aquests mesos de treball.


 ESCOLA POLITÀCNICA SUPERIOR UNIVERSITAT DE LLEIDA	Títol: Caracterització tridimensional d'estructures vegetals mitjançant escaneig 3D Autor: Marc Sales Montufo
---	--

Abstract

Nowadays, there is an increase in the usage of the 3D scanners due to their capabilities. They are devices that can simplify lot of tasks. With the data that you can record with these devices, you can generate three-dimensional models that can be used in many fields like engineering, architecture, medicine, archaeology and agriculture.

The main goal of this project is to develop a scanning methodology to carry out the 3D characterization of plants. Due to its random grow, it is very difficult to characterize and reproduce the 3D shape of plants. For this reason, when we want to reproduce this shape and volume for technical applications such as technical drawing (BIM) to be later used in simulations (energy simulations), or to be applied for precision agriculture, it is important to have a simple and extrapolable methodology to catch the 3D properties of these organisms. This data can be used to do some research or studies in sustainable construction or precision agriculture. A first step to achieve this purpose is to find the most suitable 3D scanner to characterize the complex plant 3D structure. To develop this methodology, three different 3D scanners have been compared in different situations in order to find the most suitable for this application.

The three 3D scanners used were the Kinect v2, the Intel® RealSense™ Depth Camera D435 and the Sense™ 3D scanner. To compare their performance in different situations, several scan events have been conducted under different illumination, also indoor and outdoor. In addition they were tested using different distances between the plant and the equipment. Finally, a whole comparison to find which scanner makes the best measurements was done.

 ESCOLA POLITÀCNICA SUPERIOR UNIVERSITAT DE LLEIDA	Títol: Caracterització tridimensional d'estructures vegetals mitjançant escaneig 3D Autor: Marc Sales Montufo
---	--

1. Introducció

En l'actualitat, s'ha produït un increment en l'ús dels sensors 3D ja que són eines que faciliten gran quantitat de tasques. La informació que s'obté es pot utilitzar per a construir models digitals tridimensionals que s'utilitzen en una gran varietat de camps, com enginyeria, arquitectura, medicina, arqueologia i agricultura.

En aquest treball de final de grau ens centrarem en obtenir el model digital d'estructures vegetals per poder utilitzar-lo en aplicacions d'arquitectura, més concretament, en cobertes i façanes vegetals. Les cobertes vegetals són sistemes desenvolupats per afavorir la vida vegetal a la part superior de les cobertes. Aquests sistemes, a més de protegir la impermeabilització de la construcció, aporten una àmplia gamma de beneficis estètics i ecològics com, aïllament acústic, és una eina per segregar carboni, reducció de l'escalfament, és un sistema captador i regulador de l'aigua de pluja, etc.

Un cop es té el model digital de les estructures vegetals, es pot afegir la informació recollida amb el sensor 3D al model "Building Information Modeling" (BIM). El BIM és el procés de generació i gestió de dades d'un edifici durant el seu cicle de vida, el seu objectiu és centralitzar tota la informació del projecte en un model de informació digital. El BIM suposa l'evolució dels sistemes de disseny tradicionals basats en el plànol, ja que incorpora informació geomètrica (3D), de temps (4D), de costos (5D), ambiental (6D) i de manteniment (7D).

Tot i que aquest estudi és innovador en el camp de l'arquitectura, en el camp de l'agricultura de precisió ja s'han fet alguns passos a l'hora de caracteritzar vegetació, en estudis com caracterització electrònica de la vegetació i detecció de males herbes. Per tant, aplicarem aquestes metodologies de l'agricultura de precisió a l'escaneig de vegetació per al seu ús com objectes BIM en edificació.

L'objectiu d'aquest projecte, es poder trobar una metodologia eficient i precisa a l'hora d'escanejar estructures vegetals per posteriorment poder realitzar estudis en construcció sostenible o agricultura de precisió amb les dades que s'obtinguin del escaneig. Per poder desenvolupar aquesta metodologia, utilitzarem diversos sensors 3D i realitzarem una comparació qualitativa per determinar quin sensor 3D és més eficient per aquest tipus d'aplicacions.

Per poder determinar quin sensor és el més indicat per escanejar estructures vegetals, realitzarem diferents escanejors en situacions ben diverses, com d'il·luminació. També es tindran en compte factors com versatilitat d'ús del sensor 3D, quin dels softwares del sensor és més eficient i fàcil d'utilitzar, etc.

2. Què és un sensor 3D?

2.1 Explicació

Un sensor 3D és un dispositiu capaç d'analitzar qualsevol tipus d'objecte o escenari per reunir dades de la seva forma, característiques i color, si s'escau. A partir d'un software específic del propi sensor 3D, es pot recopilar tota la informació del objecte o escenari escanejat. Hi ha una gran varietat de sensors 3D, basats en diferents principis tecnològics, com ara sensors basats en òptica, en ultrasons, etc. Cada tipus de sensor té els seus avantatges segons la seva aplicació.

La informació que s'obté es pot utilitzar per a construir un model tridimensional de l'objecte escanejat, que posteriorment s'utilitzarà en una gran varietat d'aplicacions. Inicialment es van desenvolupar en aplicacions industrials, però actualment el seu ús s'ha expandit a altres camps com arqueologia, arquitectura i, fins tot, entreteniment. El propòsit principal d'un sensor 3D, és crear un núvol de punts, un conjunt de milions de coordenades (X,Y,Z) posicionades en l'espai i en verdadera magnitud, que representen amb rigor i precisió la realitat escanejada. Gràcies a aquets punts es pot extrapolar la forma del objecte i crear el seu model tridimensional, aquest procés s'anomena reconstrucció (Fig. 1).

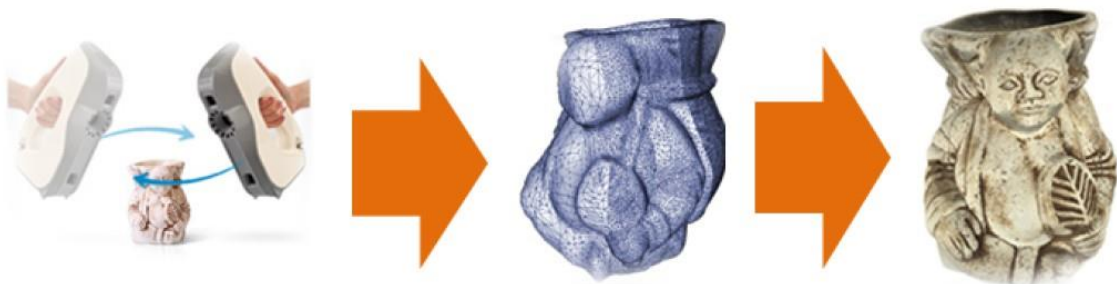



Figura 1. Procés de reconstrucció d'un objecte

Dins d'aquesta tècnica, hi ha multitud de models de reconstrucció i mètodes de mallat 3D, l'objectiu és obtenir un algoritme que sigui capaç de calcular com es relacionen els diferents punts entre si per unir-los en superfícies quadrades, triangulars o qualsevol altra forma geomètrica i obtenir un model representatiu de l'objecte. L'eficiència de l'algoritme de reconstrucció, defineix la qualitat final del mallat. Hi ha diversos algoritmes de reconstrucció, com són la reconstrucció per triangulació, reconstrucció euclidiana, reconstrucció no calibrada, etc.

 ESCOLA POLITÀCNICA SUPERIOR UNIVERSITAT DE LLEIDA	Títol: Caracterització tridimensional d'estructures vegetals mitjançant escaneig 3D Autor: Marc Sales Montufo
---	--

2.2 Història

Els sensors 3D són dispositius que s'han popularitzat recentment i que es troben en un procés constant de millora i investigació. Actualment, els sensors 3D cada vegada més es van introduint en aplicacions quotidianes, i cada cop tenen més impacte en la nostra vida. Gràcies als avenços tecnològics de la nostra generació, podem trobar models de sensors 3D ben econòmics i portàtils. Aquesta és la clau de perquè hi ha hagut aquest gran impacte dels sensors 3D, al ser més accessibles econòmicament, s'han introduït en diversos camps, facilitant tasques que anteriorment requerien de més temps i habilitat.

La primera tecnologia d'escaneig 3D va ser creada l'any 1960. El primer sensor consistia en un dispositiu format per llums, càmeres i projectors, que servien per realitzar la tasca d'escanejar. Degut a les limitacions tecnològiques de l'època, s'havia d'invertir molt temps i esforç per poder fer un escaneig precís. El problema més freqüent en que es van haver d'enfrontar durant els seus inicis, era que els sensors eren mòbils, i aquest fet afectava negativament a la nitidesa de la càmera. Després de 1985, es van introduir un tipus de sensors que utilitzaven llum blanca i suports fixes que afavorien la capturar superfícies i objectes [1][2].

L'any 1976, va haver un gran avenç quan s'inventa la impressió per injecció de tinta, es va desenvolupar una nova tècnica anomenada estereolitografia. Aquesta consistia en un tipus d'impressió capaç de generar un objecte tridimensional a partir d'unes dades digitals. Degut a aquest fet, van aparèixer els sensors 3D que s'encarregaven d'obtenir aquestes dades digitals per, posteriorment, imprimir l'objecte escanejat. No va ser fins l'any 2012, quan van començar a aparèixer les primeres impressores 3D d'ús domèstic, fet que va impulsar el desenvolupament de nous sensors 3D que poguessin ser utilitzats a casa.

2.3 Tipus de sensors 3D

Els sensors 3D principalment es poden diferenciar en funció de s'hi ha contacte amb l'objecte o no. Entre els sensors 3D sense contacte, es poden dividir dos grans grups: sensors passius i sensors actius. Tots dos grups inclouen gran varietat de tecnologies. En aquest treball explicarem els principals tipus de cada grup (Fig. 2) [3].

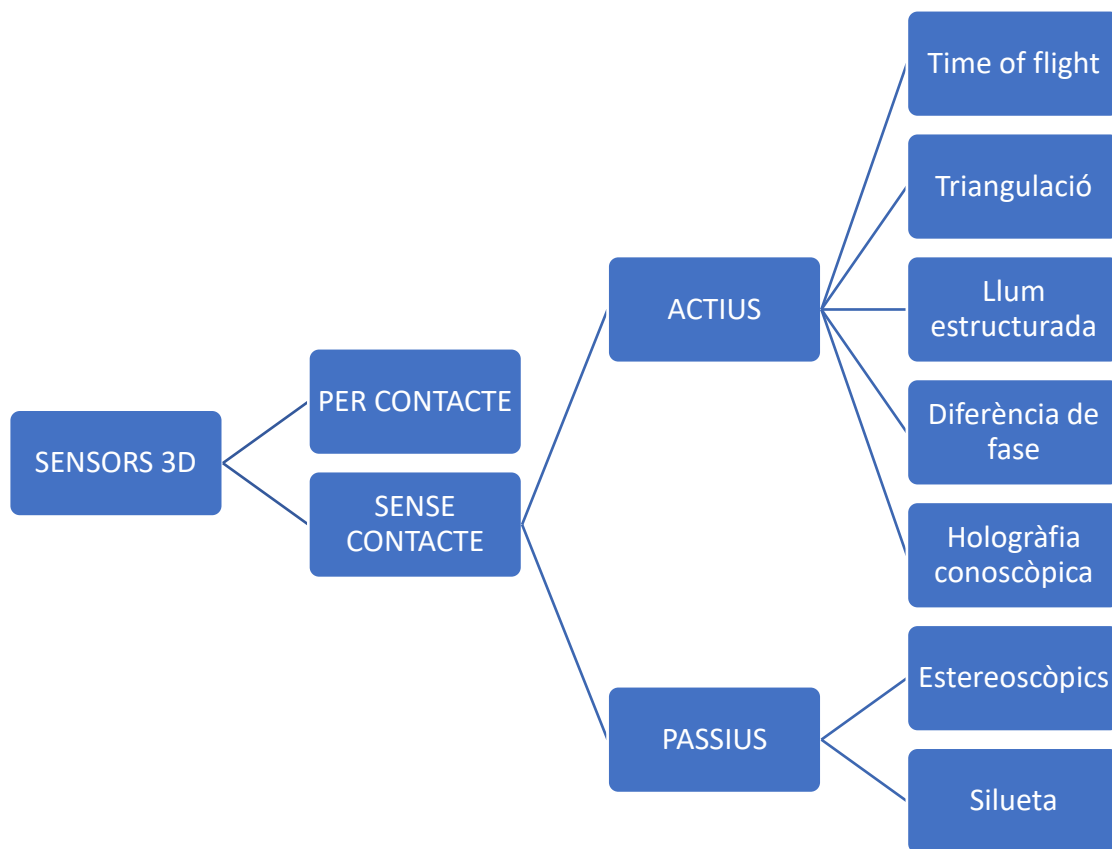


Figura 2. Principals tipus de sensors 3D

2.3.1 Sensors 3D per contacte

Aquest tipus de sensor 3D (Fig. 3) examina l'objecte amb un element, que s'anomena palpador (Fig. 4), generalment està format per una punta d'acer o safir, i s'ubica damunt de la superfície de l'objecte a escanejar. Amb el palpador es recorre tota la superfície del objecte per capturar la geometria, o simplement, es toca amb el palpador en diferents punts del objecte per obtenir coordenades XYZ. A través de sensors interns, permet determinar la posició espacial del palpador.

La principal aplicació d'aquests sensors, és per al control dimensional en processos de fabricació, ja que poden aconseguir una precisió de 0,01 mm. El gran desavantatge d'aquest tipus de sensor 3D, és que al haver contacte físic amb l'objecte, el palpador pot arribar a malmetre o danyar l'objecte a escanejar.



Per tant, no seria aconsellable utilitzar aquest tipus de sensor 3D per escanejar objectes fràgils com ara artefactes històrics, artístics o objectes de gran valor.

Els sensors 3D més comuns per contacte amb l'objecte són, les màquina de mesura per coordenades (CMM) i un braç de mesura. El desavantatge de les màquines de mesura per coordenades, és que són molt lentes en comparació envers altres sensors 3D degut a que el moviment del braç on es munta el sensor 3D pot ser molt lent.



Figura 3. Sensor 3D per contacte



Figura 4. Palpador

2.3.2 Sensors 3D sense contacte actius

Aquest tipus de sensors es caracteritzen per emetre un tipus de senyal, del qual posteriorment n'analitzen el seu retorn per poder determinar la geometria de l'objecte o escenari. Els tipus més importants són:

2.3.2.1 Time of Flight

Els sensors 3D Time of flight (TOF), estan basats en la tecnologia LIDAR (Light Detection And Ranging). Aquesta tecnologia permet determinar la distància a un objecte o superfície utilitzant polsos làser. El principi de funcionament es basa en determinar el temps que transcorre entre l'emissió d'un pols làser i la detecció del senyal reflectit a l'impactar amb un objecte. (Fig. 5) [4][5].

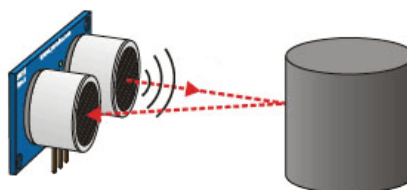


Figura 5. Principi tecnològic d'un sensor 3D TOF



Per poder calcular la distància en que es troba l'objecte, es cronometra el temps entre l'emissió del pols de llum i el seu retorn. Sabent aquest temps podem arribar a calcular de forma senzilla la distància, ja que coneixem la velocitat en que es propaga el pols (velocitat de la llum). A través d'aquesta expressió, obtenim que la distància és:

$$d = \frac{c \cdot t}{2} = \frac{3 \cdot 10^8 \cdot t}{2} [m] \quad (1)$$

L'exactitud dels sensors 3D TOF a l'hora de calcular distàncies, depèn de l'exactitud en que es cronometra el temps entre l'emissió i el retorn. Per poder tenir una precisió de mil·límetres, el sensor ha de ser capaç de cronometrar 3.3 picosegons.

Per poder realitzar un escaneig complet, el sensor varia la direcció del pols deflactant el feix de llum a través d'un sistema òptic. Per tant, l'escaneig es fa punt a punt amb una velocitat que pot assolir els 5000 – 10000 punts mesurats per segon. Els escàners 3D TOF (Fig. 6) són capaços de realitzar mesures fins a 200 metres amb un marge d'error de 6 mm aproximadament.



Figura 6. Sensor 3D TOF (Scan Station 2)

2.3.2.2 Triangulació

L'escaneig 3D per Triangulació, és la tècnica més apropiada per a escanejos a distàncies curtes, i una de les més importants i utilitzades actualment. La tècnica de triangulació (Fig. 7), consisteix en que el sensor 3D emet un pols làser que es reflexa en l'objecte a escanejar i una càmera s'encarrega de rebre el reflex, a través de càlculs trigonomètrics determina la posició. En funció de la distància entre el sensor làser i la superfície del objecte, el punt reflectit apareix en una posició diferent en el camp de visió de la càmera, formant un triangle, és el que dóna nom a aquesta tecnologia [6][7].

Per poder fer els càlculs pertinents de trigonometria, s'han de determinar certs paràmetres. La longitud entre l'emissor làser i la càmera, és coneguda. L'angle del vèrtex de l'emissor també. L'angle del vèrtex de la càmera es pot determinar mirant la ubicació del punt làser reflectit en la càmera. Amb només aquets tres valors, podem determinar les dimensions restants del triangle, i per tant, la posició de cada punt en l'espai.

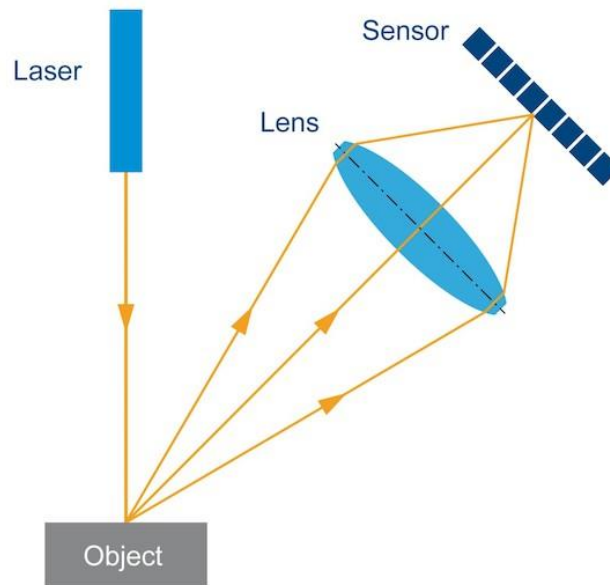


Figura 7. Principi tecnològic d'un sensor 3D per triangulació

Els sensors 3D de triangulació (Fig.8) tenen una precisió de mil·lèsimes de mil·límetre que depèn de l'angle del vèrtex del objecte a escanejar, si l'angle és superior als 90° la precisió del escaneig es veu reduïda considerablement, això limita la mida de l'escena a analitzar. Donat que aquest angle depèn de la distància entre l'emissor làser i la càmera, per augmentar el rang de mesura, suposa augmentar considerablement la mida del equip. Per tant, aquest tipus d'escàners s'utilitzen per aplicacions d'escaneig en distàncies curtes, com em esmentat anteriorment, tenint un abast de 20-30 cm.



Figura 8. Sensor 3D de triangulació (Ciclop B)



2.3.2.3 Llum estructurada

Els sensors 3D de llum estructurada es caracteritzen per emetre un patró de llum en l'objecte i analitzen la deformació que genera la geometria del objecte o escenari. Aquest patró pot ser unidimensional, una línia, o bidimensional, una quadrícula. En el cas que el patró sigui una línia, es mira la deformació de la línia i utilitzant una eina semblant a la triangulació, es calcula la distància de cada punt de la línia. Per altra banda, si el patró és una quadrícula, el projector il·lumina l'objecte amb un patró de ratlles blanques i negres col·locades de manera paral·lela per a registrar la deformació del model (Fig. 9).

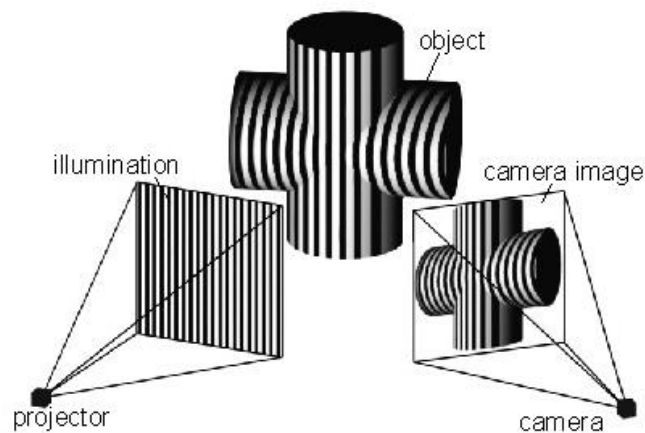


Figura 9. Principi tecnològic sensor 3D de llum estructurada

La resolució òptica del sistema està limitada, per l'amplada i la qualitat òptica de les ratlles del patró. També està limitada per la longitud d'ona de la llum. Degut a les limitacions tècniques de la càmera i la pantalla, intentar reduir el grossor de les ratlles del patró resulta ineficaç. Una càmera s'encarrega de registrar la deformació del model i a través d'un algoritme complex es calculen les distàncies a cada punt de les línies de la quadrícula.

El principal avantatge dels sensors 3D de llum estructurada, és la velocitat d'escaneig, ja que escanegen múltiples punts a la vegada. També destaquen per la gran qualitat de digitalització ja que alguns sensors 3D poden captar textures i colors. Fins i tot, alguns sistemes existents són capaços d'escanejar objectes en moviment a temps real.



2.3.2.4 Diferència de fase

El funcionament dels sensors 3D de diferència de fase (Fig. 10), es basa en l'emissió làser a diferent longitud d'ona sobre l'objecte a analitzar. Al ser reflectides i rebudes pel sensor, es pot arribar a determinar la distància de l'objecte comparant les fases de les ones emeses amb les rebudes.

Aquest tipus de sensors 3D es caracteritzen per una ràpida adquisició de punts i tenen un precisió i rang intermedi, que el situa com una solució entre els sensors 3D TOF de llarg abast i els sensors 3D de triangulació d'alta precisió. El rang d'escaneig d'aquest sensor pot arribar a variar entre els 120 i 300 metres en condicions de poca il·luminació ambiental, i el seu error pot arribar a ser de 2 mm per cada 25 m. Poden arribar a generar "punts de soroll" que exigeixen un posterior procés de filtratge i neteja de punts del model tridimensional a través d'un software d'edició de núvol de punts [8]. La velocitat d'adquisició de punts es molt alta i varia entre els 100.000 i 1.000.000 de punts per segon.

La gran majoria d'aplicacions per aquest sensor són en la indústria i en la construcció de túnels, serveixen per a la generació de plànols "as built" de plantes industrials i comprovació de túnels.



Figura 10. Sensor 3D de diferencia de fase (FARO Focus^S)

2.3.2.5 Holografia conoscòpica

És una tècnica interferomètrica (tècnica utilitzada en combinar rajos de llum de diferents receptors per aconseguir una imatge de millor resolució) en que el feix de llum es reflectit d'una superfície travessa un cristall birefringent, es a dir, un cristall que té dos índex de refracció diferents, un fixe i l'altre que depèn de l'angle d'incidència del raig en la superfície del cristall.



Al travessar el cristall, s'obtenen dos rajos que es fan interferir utilitzant una lent cilíndrica i aquesta interferència es capturada per un sensor d'una càmera convencional obtenint un patró de franges. La freqüència d'aquesta interferència determina la distància de l'objecte en que es va projectar el feix.

Generalment, els sensor 3D de holografia conoscòpica (Fig. 11), s'utilitzen per a l'escaneig d'orificis microscòpics, capaços de mesurar micres. Tot i així, les aplicacions d'aquest sensor són d'una gran varietat, des de l'enginyeria inversa fins a la inspecció de defectes superficials en la indústria del acer a altes temperatures. L'holografia conoscòpica fou descoberta per Gabriel Sirat i Demetri Psaltis l'any 1985.

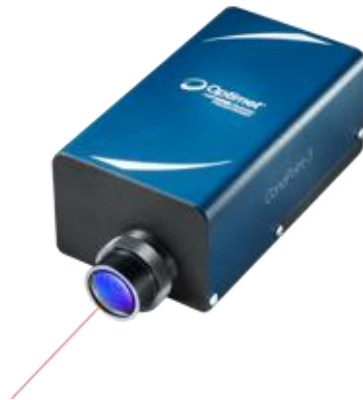


Figura 11. Sensor 3D de holografia conoscòpica (ConoPoint-3)

2.3.3 Sensors 3D sense contacte passius

Els escàners 3D passius, es caracteritzen per no emetre cap mena de radiació o senyal, sinó, que detecten la radiació reflectida en l'ambient. Per tant, aquest tipus d'escàner es centra en detectar la llum visible ja que és una radiació ja disponible en l'ambient. Els escàners passius són més barats ja que no necessiten un hardware específic. Els tres tipus més importants d'escàners passius són:

2.3.3.1 Estereoscòpics

Els sistemes estereoscòpics (Fig. 12), es basen en el mateix principi que la fotogrametria. Generalment, s'utilitzen dos càmeres de vídeo, lleugerament separades, apuntant a la mateixa escena. Analitzen les lleus diferències entre les dos imatges dels diferents dispositius i així poden determinar la distància en cada punt de la imatge. Pràcticament, funciona com la visió estereoscòpica humana.



Figura 12. Sensor 3D estereoscòpic (Fuel 3D Scanify)

2.3.3.2 Silueta

Aquest tipus d'escàners 3D, utilitzen els contorns creats a partir d'una seqüència de fotografies fetes al voltant del objecte a escanejar. Aquest objecte tridimensional es posa contra un fons de contrast per poder determinar amb major precisió el seu contorn.

Posteriorment, es separen les siluetes obtingudes i es combinen buscant l'eix de rotació de la càmera per poder determinar una aproximació de l'objecte. Amb aquest tipus d'escàners, no es poden detectar concavitats del objecte, com ara, l'interior d'un recipient.

2.4 Principals aplicacions

El diseg humà de crear i replicar objectes tridimensionals no és gens inusual. La humanitat ho ha estat fent durant milers d'anys utilitzant una gran varietat de materials. L'ús dels escàner 3D s'ha estès poc a poc des de la indústria, a altres camps ben diversos per facilitar aquesta tasca. Els avenços en aquesta tecnologia, han fet que aquests tipus de productes s'abaratissin, i per tant, que fossin més accessibles econòmicament. Aquesta és la principal clau per a que l'escaneig 3D, s'hagi estès tant actualment. Les principals aplicacions de l'escaneig 3D són:

- Enginyeria:

L'àrea més potent per a l'escaneig 3D, és l'enginyeria. La capacitat que té un sensor 3D per poder replicar la geometria de qualsevol objecte, és de gran utilitat en aquest sector. Aquests dispositius són de gran utilitat en enginyeria inversa, ja que permeten escanejar un objecte per obtenir el seu model tridimensional digital i posteriorment poder modificar el seu disseny amb qualsevol programa CAD [9][10].

Altres aplicacions en la indústria, serien el disseny industrial i la manufactura. Els sensors 3D permeten comprovar la qualitat d'una peça que requereixi una gran precisió (Fig. 13). Es poden realitzar mesures detallades de peces i investigar propietats mecàniques. Un cop fabricat el component, s'escaneja i es compara amb el model teòric creat per ordinador, permetent realitzar un control minuciós sobre la producció. També s'utilitza per modificar dissenys a partir de models creats a mà.



Figura 13. Escaneig 3D d'una peça

- Arquitectura:

En l'àmbit de l'arquitectura, implica la re-invenió de moltes tasques, un exemple és la producció de maquetes (Fig. 14). Antigament, una maqueta era un procés costos que podia arribar a allargar-se mesos, fins i tot, el resultat depenia de les habilitats de la persona que executava el treball. Aquest canvi, suposa un nou salt en el qual el verdader repte és el del disseny. Gràcies a la impressió 3D es pot obtenir, pràcticament, qualsevol forma, per complexa que sigui, i ja no depens de l'habilitat de la persona en realitzar la maqueta [11].

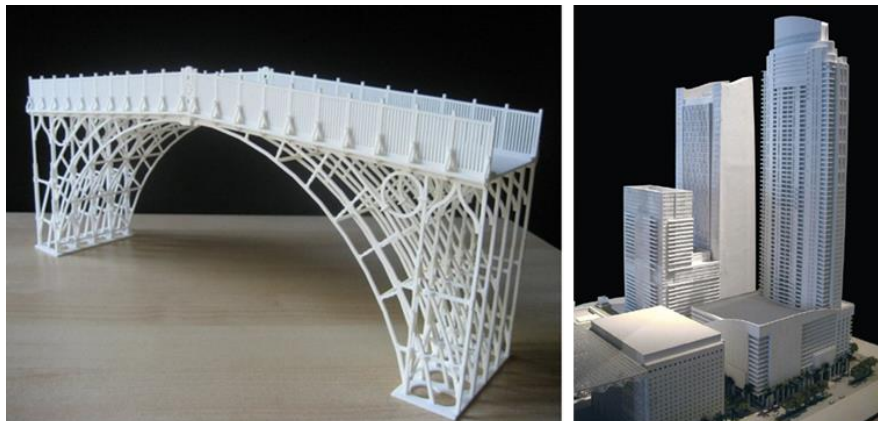


Figura 14. Maqueta feta a través d'escaneig 3D



El fet de tenir un model digital 3D de l'edifici, permet crear objectes BIM als quals se'ls pot donar determinades propietats, com per exemple tèrmiques, i fer simulacions tèrmiques de tot l'edifici.

També hi han sistemes constructius com les cobertes o façanes vegetals en les que s'incorpora vegetació a l'edifici, aquesta vegetació és molt difícil de caracteritzar tridimensionalment, per això hi ha la necessitat de començar a realitzar aquets estudis d'escaneig de plantes per poder veure el potencial que es té de cara a definir els elements BIM 3D de la vegetació.

Una altra tasca que ha reinventat l'escaneig 3D, són els estudis arquitectònics. La capacitat que té l'escàner d'analitzar objectes tridimensionals, permet analitzar edificis a gran detall, permetent obtenir models precisos de la situació real d'un edifici o instal·lació, de manera que es poden realitzar projectes de documentació o manteniment basats en la situació real. A més, permeten comparar l'evolució temporal dels objectes, permetent identificar deformacions, moviments, etc.

- Medicina:

Les aplicacions mèdiques, són les que més sorprenen dins l'àmbit del escaneig 3D. Gràcies a aquesta tecnologia, els metges poden crear i personalitzar les diverses solucions per a cada pacient, ja que cada persona és única en la seva aparença física.

Un exemple de les aplicacions de l'escaneig 3D en la medicina, són les pròtesis (Fig. 15). L'escaneig 3D, permet el disseny i producció d'una pròtesis amb una precisió notable, el que significa comoditat, millor mobilitat i reducció del dolor per al pacient. Un altre camp en que l'escaneig 3D és de gran utilitat, és en l'odontologia, gràcies a aquets dispositius tan precisos es facilita la fabricació d'implants dentals o aparells ortodòntics, que són diferents per a cada pacient.



Figura 15. Disseny de pròtesis amb escaneig 3D



El gran avantatge de l'escaneig 3D, és que és ràpid i inofensiu, i la precisió que et pot arribar a oferir no té punt de comparació amb els treballs fets a mà. Les característiques generals pel qual l'escaneig 3D és tant eficient en l'àmbit de la medicina, és gràcies a la seva capacitat de poder escanejar de manera molt ràpida al pacient i poder analitzar al instant els resultats. Principalment, els sensors 3D sense contacte són els més adients per aplicacions mèdiques.

- Ciència i educació:

Universitats, col·legis i laboratoris estan acceptant l'escaneig 3D com una poderosa eina que permet als estudiants i investigadors estudiar artefactes amb major detall que mai abans els hi era possible per el risc de malmetre'ls.

Els museus líders a nivell mundial utilitzen els escàners 3D per a digitalitzar artefactes i crear galeries online (Fig. 16), facilitant així l'accés a les seves col·leccions als especialistes, acadèmics o estudiants sense importar on es trobin. A diferència dels objectes originals, els quals sol es poden veure a través d'una vitrina de vidre en un museu en el qual són exhibits, amb les seves còpies 3D poden ser examinades des de qualsevol angle en diferents resolucions.



Figura 16. Museu britànic digitalitzant la seva col·lecció

Un altre camp en que l'escaneig 3D és considerada una eina de gran importància és en arqueologia. Per poder fer la recreació d'un jaciment, es necessita poder recopilar informació precisa i detallada dels diferents elements que constitueixen l'escenari. Una de les principals funcions de l'arqueologia, és la de restauració d'objectes històrics, amb un bon escanejat es pot obtenir un model fidedigne a la realitat en el que es pot estudiar i analitzar tranquil·lament sense por a malmetre l'objecte.

- Art:

L'escaneig 3D obre un món de possibilitats per als artistes de qualsevol mena, permetent-los traduir les seves fantàstiques idees a la realitat. Pel que fa a la indústria del cine, gràcies a l'escaneig 3D s'han pogut realitzar gran efectes especials, reconstrucció de ciutats senceres, monuments, etc. que sense aquesta tecnologia serien gairebé impossibles de realitzar.

Un dels grans avantatges de l'escaneig 3D, i un dels més interessants, és que permet digitalitzar monuments històrics per a poder preservar les seves còpies exactes per a la posteritat (Fig. 17). El gran problema d'aquests monuments històrics, és que a través del temps es malmeten i poden arribar a desintegrar-se [12]. Gràcies al model digital que es pot obtenir amb els sensors 3D, la tasca de manteniment i rehabilitació es facilita substancialment, poden realitzar primerament els estudis en el model digital per posteriorment aplicar-ho a la realitat.



Figura 17. Digitalització de la torre Eiffel

3. Materials i mètodes

3.1 Sensors utilitzats

En aquest apartat exposarem i analitzarem els sensors 3D emprats en aquest treball de final de grau. Durant aquets mesos de recerca, hem utilitzat tres sensors 3D de gran importància en el mercat, aquets sensors són: el sensor Intel® RealSense™ Depth Camera D435, el sensor Kinect v2 i el sensor Sense™ 3D scanner.


3.1.1 Intel® RealSense™ Depth Camera D435

Intel® RealSense™ Technology proporciona informació sobre detecció de profunditat i seguiment, dissenyat per donar a les màquines i dispositius percepció de profunditat, capacitat que els permet “veure” i per tant, entendre el món que ens envolta. Gràcies al seu gran camp de visió, aquest sensor és perfecte per aplicacions robòtiques, realitat virtual o realitat augmentada, aplicacions en que sigui de vital importància veure el màxim d’una escena [13].

El sensor 3D d’Intel (Fig. 18), és un sensor estereoscòpic actiu, ja que té un mòdul de projecció infraroja (IR). També aquest sensor, té un rang d’escaneig major als 10 metres. Al ser un sensor 3D tant petit pot ser integrat amb facilitat en qualsevol dispositiu, complementat amb el software “Intel RealSense SDK 2.0” i amb suport multi plataforma. [14]



Figura 18. Sensor 3D Intel® RealSense™ Depth Camera D435

 ESCOLA POLITÈCNICA SUPERIOR UNIVERSITAT DE LLEIDA	Títol: Caracterització tridimensional d'estructures vegetals mitjançant escaneig 3D Autor: Marc Sales Montufo
--	--

ESPECIFICACIONS:

La versió D435 funciona amb USB 3.0, consta de dos sensors de profunditat col·locats al voltant del projector infraroig i un mòdul RGB per poder captar els colors i tonalitats de l'objecte a analitzar (Fig. 19). En cas que es connecti el sensor 3D en un USB 2.0, el software d'Intel només captura la imatge IR del projector, sense recopilar la informació de color del objecte o escenari. Les especificacions d'aquest sensor estan recollides en la taula següent (Taula 1). [15][16]

Taula 1. Taula d'especificacions del sensor Intel® RealSense™ Depth Camera D435

Intel RealSense D435	
Entorn	Interior i exterior
Tecnologia de profunditat	Estèreo IR actiu
Tecnologia de sensors d'imatge	Obturador global: tamany 3 μm x 3 μm píxels
Principals productes Intel® RealSense™	Processador de visió Intel® RealSense™ D4 Mòdul Intel® RealSense™ D430
Camp de visió de profunditat (FOV)— Horitzontal x Vertical per HD 16:9	85.2° x 58° (+/- 3°)
Resolució de processament de transmissió en profunditat	Fins 1280 x 720
Velocitat de quadre de transmissió en profunditat	Fins 90 fps
Distància de profunditat mínima (Min-Z)	0.11 m
Rang màxim	Aproximadament 10 m La precisió varia depenent de la calibració, l'escena i les condicions d'il·luminació
Frame rate i resolució de sensor RGB	1920 x 1080 a 30 fps
Camp de visió de sensor RGB (horitzontal x vertical)	69.4° x 42.5° (+/- 3°)
Dimensió de càmera (llarg x profunditat x altura)	90 mm x 25 mm x 25 mm
Connector	USB tipo C
Mecanisme de muntatge	Un punt de muntatge de rosca UNC 1/4-20 Dos punts de muntatge de rosca M3

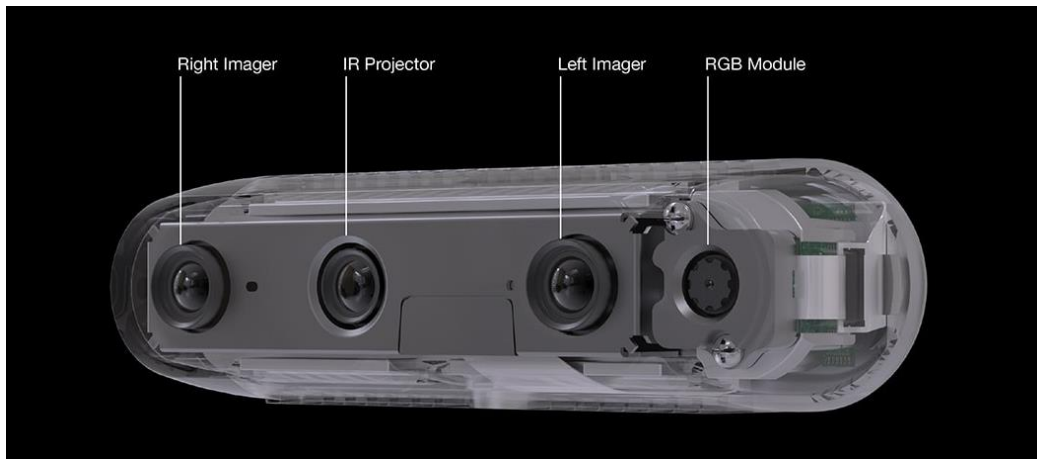


Figura 19. Components que formen el sensor Intel® RealSense™ Depth Camera D435

3.1.2 Kinect v2

El sensor 3D Kinect de Microsoft (Fig. 20), és probablement un dels models més populars i representatius dins del mercat dels sensors “low-cost”. Aquesta és la raó per la qual aquest sensor és tan utilitzat en una gran varietat d’aplicacions tecnològiques i científiques. Inicialment, es va desenvolupar aquest dispositiu per a ser un controlador de videojocs i d’entreteniment per a la consola “XBOX 360”, l’any 2010. Kinect permet als usuaris controlar i interaccionar amb la consola sense necessitat de contacte físic amb un controlador de videojocs tradicionals, mitjançant una interfície natural d’usuari que reconeix gestos, comandes de veu, objectes i imatges.



Figura 20. Sensor 3D Kinect v2 per a Windows

Tot i que en el camp dels videojocs no va acabar de ser molt popular, investigadors i desenvolupadors van trobar un altre ús per a la Kinect. Microsoft va haver de reconsiderar donar a la Kinect un ús per a aplicacions més neutral. Microsoft va publicar una versió beta del software de la Kinect “Software Development Kit” (SDK) per a aplicacions amb Windows 7, l’any 2011. Aquest SDK permetia als desenvolupadors crear aplicacions per a la Kinect amb C++/CLI, C# o Visual Basic .NET.



Al haver estat dissenyada per a ser un complement d'una consola, la Kinect de Microsoft va estar pensada per aplicacions "indoor", és a dir, entorns amb nivells d'il·luminació baixos. És aquest el motiu pel que la gran majoria de recerques amb aquest dispositiu es realitzen en aquest tipus d'entorns.

ESPECIFICACIONS:

La Kinect v2, és un sensor 3D basat en el principi tecnològic "Time of Flight" (TOF), format per dues càmeres, una RGB col·locada a l'esquerra del sensor, i una infraroja (IR) al centre del dispositiu (Fig. 21). Aquest sensor capta la il·luminació activa de l'escena a través dels tres projectors IR i calcula la distància del objecte, tal com em explicat en l'apartat 2.3.2.1. Les especificacions tècniques del sensor Kinect v2 que proporciona la pàgina web de Microsoft estan recollides en la següent taula (Taula 2). [17,18,19]



Figura 21. Components que formen la Kinect v2

Taula 2. Taula d'especificacions tècniques de la Kinect v2

Kinect v2	
Principi tecnològic	Time of flight
Entorn	Interior
Resolució càmera infraroja (IR)	512 x 424 píxels
Resolució càmera RGB	1920 x 1080 píxels
Camp de visió	70 x 60 graus
Frame rate	30 frames per segon
Rang de mesura	Mínim: 0.5 m Màxim (Depèn de les condicions de mesura): 4.5 m
Connector	USB 3.0



3.1.3 Sense™ 3D scanner

El sensor Sense 3D scanner (Fig. 22), és un sensor portàtil, ràpid, fàcil d'utilitzar, dissenyat per l'empresa 3D Systems. Es caracteritza per ser un sensor 3D de mà, amb un rang d'escaneig curt capaç d'escanejar colors a resolució "Full HD". Utilitza càmeres RGB HD i uns projectors infrarojos molt precisos, que permet al sensor captar amb major precisió i major resolució que altres dispositius en el mercat. [20]

Sense 3D scanner, és un sensor molt versàtil, ja que està pensat per aplicacions industrials i d'investigació, però alhora, per a un ús familiar o acadèmic, ja que és un sensor 3D de petites dimensions i el seu cost en el mercat és d'aproximadament 400 €, molt barat envers altres models.



Figura 22. Sense™ 3D Scanner

ESPECIFICACIONS:

Aquest sensor és un dels més precisos en el mercat, capaç d'escanejar amb 1 mm de precisió i amb una resolució RGB de 1920 x 1080 píxels, la mateixa resolució que la Kinect v2 i el sensor d'Intel, per poder captar un perfecte mapa de color. Tot i ser un sensor amb un rang d'escaneig curt, pot arribar a escanejar objectes i escenes a una distància màxima de 1.6 m. Aquest model també es basa en el principi tecnològic TOF, està format per un projector infraroig i el seu receptor, localitzats en el centre del sensor; i la càmera RGB en la part inferior (Fig. 23). [21]

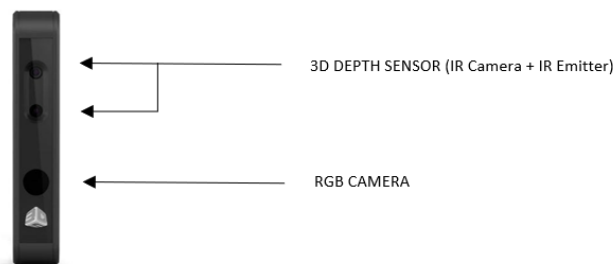



Figura 23. Components del sensor Sense™ 3D Scanner

 ESCOLA POLITÈCNICA SUPERIOR UNIVERSITAT DE LLEIDA	Títol: Caracterització tridimensional d'estructures vegetals mitjançant escaneig 3D Autor: Marc Sales Montufo
--	--

Les especificacions tècniques que proporciona la pàgina web oficial de 3D Systems del producte són les que estan reflectides en la taula (Taula 3).

Taula 3. Taula d'especificacions tècniques Sense™ 3D Scanner

Sense™ 3D Scanner	
Sistema operatiu compatible	64-bit Windows 8 o superior
Rang d'escaneig	Mínim: 0.2 m Màxim: 1.6 m
Camp de visió	Horitzontal: 45º Vertical: 57.5º Diagonal: 69º
Resolució càmera RGB	1920 x 1080 píxels
Frame rate	30 frames per segon
Volum d'escaneig	Mínim: 0.2 m x 0.2 m x 0.2 m Màxim: 2 m x 2 m x 2 m
Resolució càmera infraroja (IR)	640 x 480 píxels
Resolució espacial x/y a 0.5 m	0.9 mm
Resolució de profunditat a 0.5 m	1 mm
Dimensions	12.9 x 17.8 x 3.3 cm
Connector	USB 3.0

3.2 Softwares utilitzats

3.2.1 Intel® RealSense™ SDK 2.0

Intel® RealSense™ SDK 2.0 és una aplicació multi plataforma desenvolupada per poder treure el màxim profit a les solucions que proporciona la gama de sensors 3D d'Intel® RealSense™ Depth Cameras (D400-series). Incorpora tot el necessari per poder desenvolupar els teus propis projectes i configurar el teu sensor per l'aplicació que sigui necessària.

En aquest software de desenvolupament, s'inclouen gran varietat d'aplicacions: Intel® RealSense™ viewer, Depth quality tool, Debug tool, exemples de codi, etc. A continuació es detallen les dues eines que han estat emprades en aquest treball de final de carrera:

- Intel® RealSense™ viewer:

Gràcies a aquesta eina, es pot accedir ràpidament al teu sensor 3D Intel® RealSense™ Depth Camera D435 o D415 per poder visualitzar a temps real l'escaneig del sensor (Fig. 24). Es poden visualitzar múltiples càmeres a la vegada.

Una de les funcionalitats més importants, és que el software et permet visualitzar i explorar el núvol de punts que genera el sensor en directe i exportar-ho en un fitxer .PLY, per posteriorment editar-lo. Per últim però no menys important, es poden configurar els ajustaments de la càmera per fer l'escaneig més adequat per cada situació. [22]

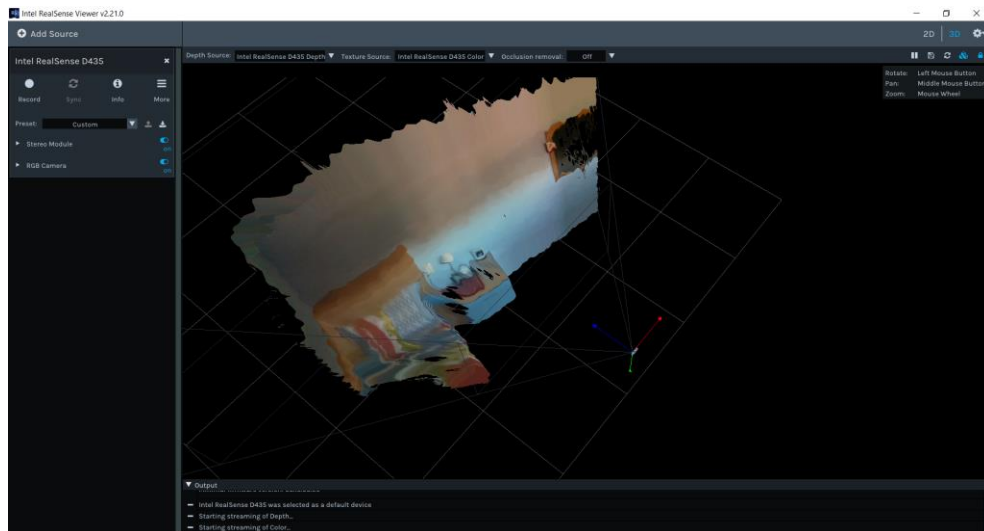


Figura 24. Software Intel® RealSense™ viewer: escaneig a temps real

- Depth Quality Tool

Aquesta aplicació et permet comprovar la qualitat del sensors de profunditat del dispositiu (Fig. 25). Els paràmetres que analitza són la precisió en el eix Z, el soroll espacial, el “Fill rate”, la precisió en el càlcul de la distància, etc. És una eina senzilla on es poden interpretar diversos paràmetres de qualitat i guardar les dades per fer posteriors anàlisis. [23]

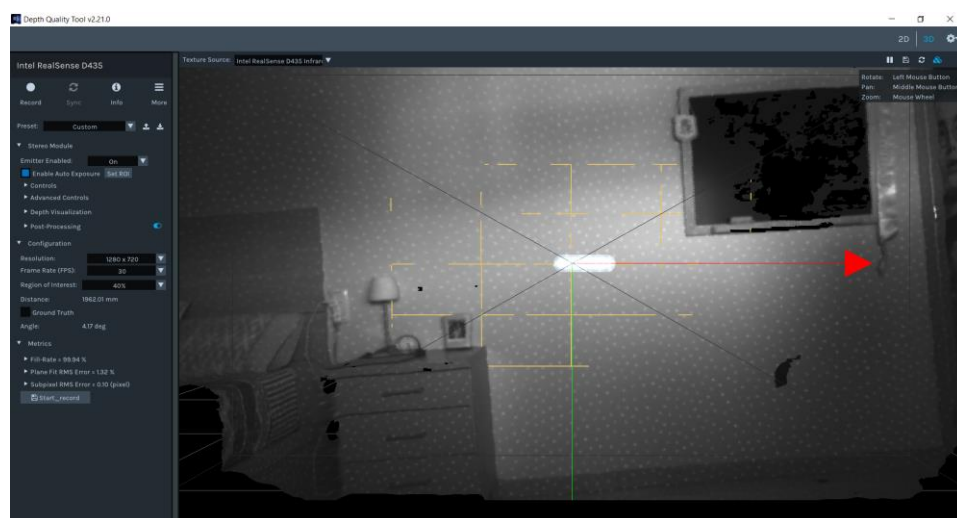



Figura 25. Depth Quality Tool

 ESCOLA POLITÀCNICA SUPERIOR UNIVERSITAT DE LLEIDA	Títol: Caracterització tridimensional d'estructures vegetals mitjançant escaneig 3D Autor: Marc Sales Montufo
---	--

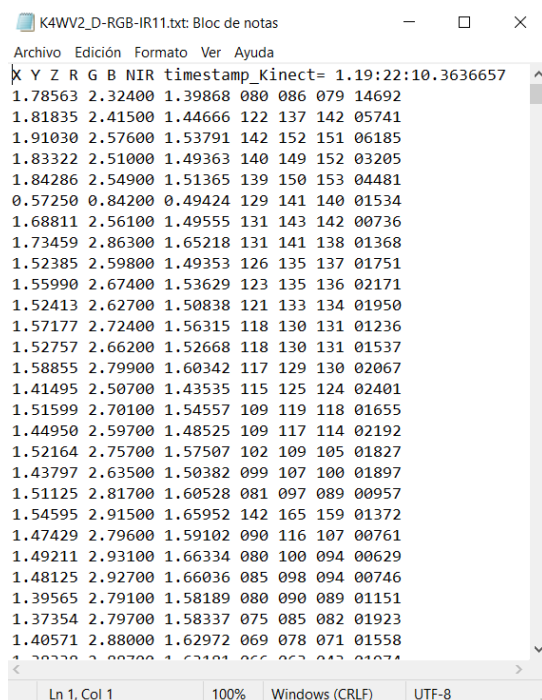
El procediment a seguir per poder utilitzar aquesta eina és:

1. Col·locar el sensor a una distància dins del seu rang d'escaneig (entre 0.3 i 2 metres) en una superfície plana que no reflecteixi.
2. Apuntar al objecte a escanejar durant uns segons fins que l'eina detecti la superfície.
3. Ajustar l'angle de la càmera per poder col·locar el sensor perpendicular a la superfície.
4. Revisar els paràmetres de qualitat de profunditat.
5. Clicar "Start_record" per poder obtenir les dades per al posterior anàlisis.

3.2.2 Kinect3D GPS

Kinect3D GPS és una aplicació desenvolupada a la UdL pel "Grup de Recerca en AgròTICa i Agricultura de Precisió" (GRAP), per realitzar operacions agrícoles en el moment adequat i de la manera adequada. Gràcies al SDK de la Kinect v2, es va poder desenvolupar una aplicació amb C# a través del software "Visual Studio".

Aquesta aplicació, bàsicament genera un fitxer ".txt" (Fig. 26) amb les coordenades X, Y i Z dels punts que detecta el sensor 3D i per cada punt vincula el seu valor RGB així com la intensitat del senyal de retorn (infraroig: IR). Aquest fitxer que es genera, és el núvol de punts del objecte a escanejat. Aquest fitxer s'obté amb la combinació de les dades que genera el sensor IR i la càmera RGB. Per cada escaneig, el programa guarda la imatge IR i la imatge que realitza la càmera per posteriorment analitzar-ho.



```

K4WV2_D-RGB-IR11.txt: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
X Y Z R G B NIR timestamp_Kinect= 1.19:22:10.3636657
1.78563 2.32400 1.39868 080 086 079 14692
1.81835 2.41500 1.44666 122 137 142 05741
1.91030 2.57600 1.53791 142 152 151 06185
1.83322 2.51000 1.49363 140 149 152 03205
1.84286 2.54900 1.51365 139 150 153 04481
0.57250 0.84200 0.49424 129 141 140 01534
1.68811 2.56100 1.49555 131 143 142 00736
1.73459 2.86300 1.65218 131 141 138 01368
1.52385 2.59800 1.49353 126 135 137 01751
1.55990 2.67400 1.53629 123 135 136 02171
1.52413 2.62700 1.50838 121 133 134 01950
1.57177 2.72400 1.56315 118 130 131 01236
1.52757 2.66200 1.52668 118 130 131 01537
1.58855 2.79900 1.60342 117 129 130 02067
1.41495 2.50700 1.43535 115 125 124 02401
1.51599 2.70100 1.54557 109 119 118 01655
1.44950 2.59700 1.48525 109 117 114 02192
1.52164 2.75700 1.57507 102 109 105 01827
1.43797 2.63500 1.50382 099 107 100 01897
1.51125 2.81700 1.60528 081 097 089 00957
1.54595 2.91500 1.65952 142 165 159 01372
1.47429 2.79600 1.59102 090 116 107 00761
1.49211 2.93100 1.66334 080 100 094 00629
1.48125 2.92700 1.66036 085 098 094 00746
1.39565 2.79100 1.58189 080 090 089 01151
1.37354 2.79700 1.58337 075 085 082 01923
1.40571 2.88000 1.62972 069 078 071 01558
1.38328 2.88700 1.63101 066 063 063 01071

```

Figura 26. Núvol de punts en format .txt

El software, es caracteritza per tenir una interfície on apareix a temps real el que capta la càmera RGB i el projector IR i les opcions per poder fer l'escaneig (Fig. 27). Per poder començar a escanejar, s'ha de seleccionar l'opció "Auto Frame Capture" i clicar al botó "Start" per començar (Fig. 28). El software que em van facilitar, només permetia fer una captura, tot i que, disposen d'altres softwares modificats on es realitzen diferents captures cada "X" segons que tu determinis en el codi del software.

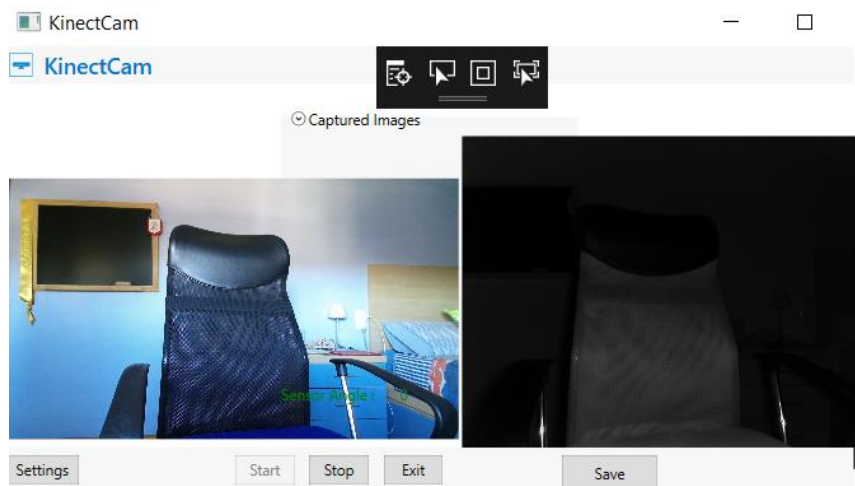


Figura 27. Interfície Kinect3D GPS

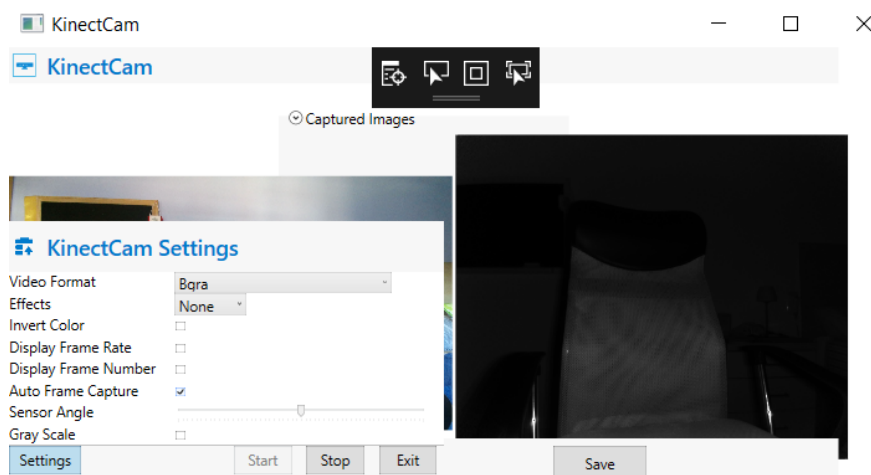



Figura 28. KinectCam Settings

 ESCOLA POLITÀCNICA SUPERIOR UNIVERSITAT DE LLEIDA	Títol: Caracterització tridimensional d'estructures vegetals mitjançant escaneig 3D Autor: Marc Sales Montufo
---	--

3.2.3 Sense™

El sensor Sense™ 3D scanner, inclou el software Sense™. És un software molt pràctic i fàcil d'utilitzar, que et permet editar ràpidament les dades obtingudes per el sensor 3D, crear el modelat 3D per posteriorment realitzar la seva impressió de manera immediata i et permet desar les dades en quatre formats industrials estàndards.

Gràcies a aquest sensor, pots pensar que escanejar és una mena de fotografia tridimensional. A diferència de la fotografia tradicional, amb el model digital es pot arribar a desenvolupar un model físic enviant la imatge a una impressora 3D. Sense™ 3D scanner et permet poder analitzar una escena en tres dimensions i transformar aquesta escena en un model tridimensional. Gràcies al software desenvolupat per 3D Systems, aquests escanejos poden arribar a donar informació com:

- Identificació de persones i característiques físiques (Fig. 29).
- Classificació d'objectes com mobles, paquets, etc.
- Mesuraments com dimensions, àrees, volums, etc.
- Localització de parets, sostres i terres.

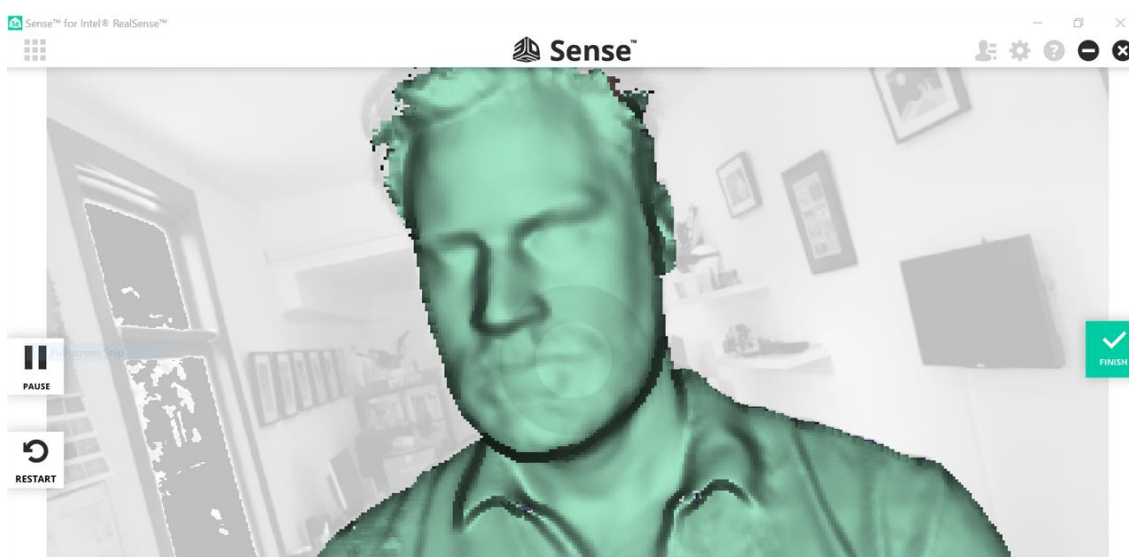


Figura 29. Identificació d'una persona amb Sense™ 3D scanner

Un cop és té el model tridimensional, el software Sense™ et permet poder netejar i depurar el model a través d'una gran varietat d'eines per poder acabar de perfeccionar el model digital de l'objecte escanejat.



3.2.4 CloudCompare

CloudCompare és un software, dissenyat per l'enginyer francès Daniel Girardeau-Montaut, i com el seu nom indica serveix per comparar i realitzar estudis sobre núvols de punts, i fins i tot, mallats triangulars. Aquest software està desenvolupat amb C++, i actualment pot ser compilat en Windows, Linux i Mac OS i per arquitectures de 32 i 64 bits. Originalment, aquest software va estar pensat per poder comparar núvols de punts ben densos per realitzar estimacions sobre els diferents mesuraments d'un mateix objecte, d'aquesta forma es possible determinar deformacions o irregularitats. [24]

CloudCompare considera tots els models 3D com a núvols de punts. Un mallat triangular no deixa de ser un núvol de punts amb una topologia. Això explica perquè tot mallat està format per un núvol de punts anomenat "vertices" (Fig. 30). Tot i que CloudCompare permet utilitzar certes eines directament en el mallat, n'hi ha moltes altres que només poden ser utilitzades en els "vertices", ja que com el nom indica, és un software per processar núvols de punts. [25]

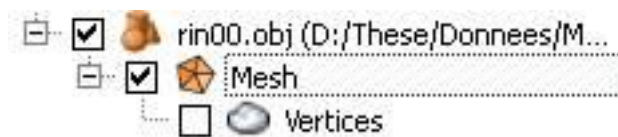


Figura 30. Núvol de punts d'un mallat

Per damunt de tots els complements que es poden associar en un núvol de punts, hi ha una eina que destaca per sobre de la resta, aquesta és el "scalar field" (Fig. 31). Bàsicament s'associa un valor per cada punt del núvol i és possible mostrar aquets valors a través de colors. Aquets colors poden donar informació com ara la distancia, la intensitat del senyal de retorn o el valor RGB (color real de l'objecte).

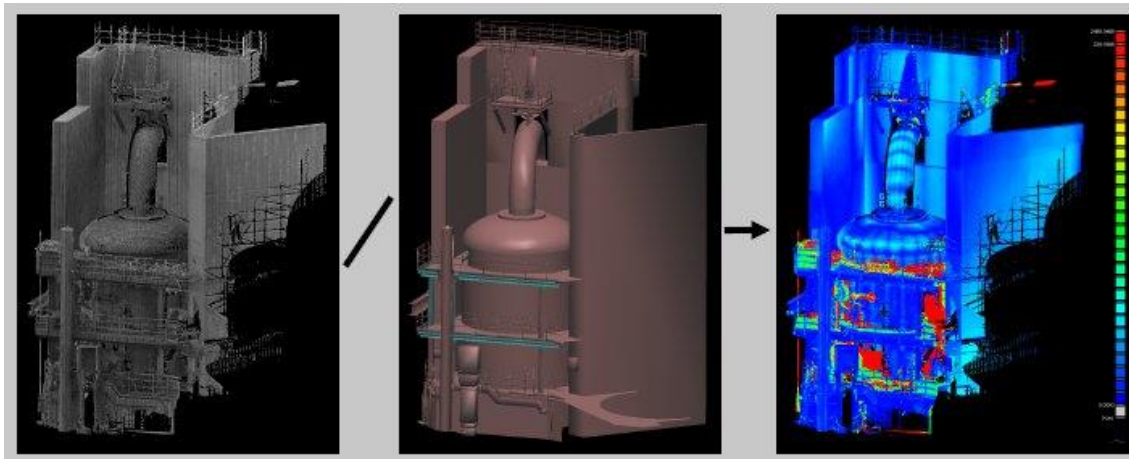



Figura 31. Comparació entre un núvol i un mallat

 ESCOLA POLITÀCNICA SUPERIOR UNIVERSITAT DE LLEIDA	Títol: Caracterització tridimensional d'estructures vegetals mitjançant escaneig 3D Autor: Marc Sales Montufo
---	--

L'objectiu de CloudCompare, és poder gestionar el màxim número de punts sense perdre l'eficiència del software, un bon balanç entre emmagatzematge i velocitat de còmput. Actualment, el software pot emmagatzemar 90 milions de punts per gigabyte de memòria. Si se li afegeix color o un "scalar field", la xifra es redueix a 32 milions de punts per gigabyte.

En un sistema operatiu de 64 bits, pràcticament pots carregar tots el punts que es vulgui, per ser més concrets, més de 4 bilions de punts. Aquestes dades poden variar depenent de la gràfica i la potència de l'ordinador.

Tot i que el software es va començar a desenvolupar l'any 2004, no va ser fins l'any 2009 que es va fer públic. Al ser un software de codi obert, tothom és lliure de millorar i estendre les capacitats del programa.

3.3 Part experimental

La part experimental d'aquest TFG, consisteix en la comparació qualitativa de diferents sensors 3D a l'hora d'escanejar estructures vegetals i en trobar una metodologia eficient per poder escanejar aquestes estructures per caracteritzar-les tridimensionalment. L'objectiu és poder utilitzar aquesta metodologia en els àmbits de la construcció sostenible (cobertes vegetals) i de l'agricultura de precisió. Els sensors 3D emprats són els esmentats en apartats anteriors: Microsoft Kinect v2, Intel® RealSense™ Depth Camera D435 i Sense™ 3D scanner.

3.3.1 Plantes a escanejar

Les plantes que hem estat utilitzant en els nostres escanejos, han sigut de l'espècie nomenada "Sedum sediforme" (Fig. 32). Aquesta planta és caracteritza per ser utilitzada en construcció sostenible per a la creació de cobertes i façanes enjardinades per les seves peculiars característiques. Es tracta de plantes crases que emmagatzemen molta aigua en el seu interior i que tenen una estructura foliar molt particular. Aquestes característiques les fan molt eficients a l'hora d'afrontar climatologies adverses.

D'altra banda, aquesta estructura foliar és complexa i difícil de caracteritzar, fet pel qual s'ha considerat oportú de començar per aquesta tipologia de plantes per a fer les primeres comparatives entre sensors. La possibilitat d'obtenir el model 3D d'aquestes plantes pot en un futur proper permetre la seva millor representació 3D com a objectes BIM, per a posteriorment poder-los dotar de propietats específiques com la reflexió lumínica, la capacitat transpirativa, etc. de gran importància a l'hora de simular tèrmicament el funcionament d'aquests sistemes constructius.



Figura 32. Sedum Sediforme

3.3.2 Metodologia d'escaneig

Per tal de poder definir la metodologia d'escaneig més adient, es van desenvolupar dues metodologies d'escaneig diferents, degut a que el software del sensor Sense™ 3D scanner permetia realitzar tot l'escaneig del perímetre de la planta i generar el núvol de punts complet sense necessitat d'utilitzar el software CloudCompare.

La metodologia per al sensor Sense™ 3D scanner, va consistir en deixar el sensor 3D fixe ancorat en un trípede apuntant a la planta a escanejar. La planta es va col·locar centrada damunt d'una cadira, col·locada a aproximadament 0.4 m (el rang mínim per poder escanejar amb el sensor Sense™ 3D scanner) del sensor 3D. El procediment per escanejar la planta consistia en rotar lentament la cadira per a que el software pogués captar tot el volum i geometria de la planta (Fig. 33). Per poder obtenir un bon model 3D, es van realitzar diverses passades amb el sensor 3D fins que en el software es veia el model 3D complet.



Figura 33. Escenari escaneig amb el sensor Sense™ 3D scanner



Un cop es va tenir el model 3D de la planta, es va exportar el fitxer en format .PLY (mallat triangular) per poder utilitzar-lo en el software CloudCompare. Per poder analitzar i realitzar mesures en el núvol de punts generat pel sensor Sense™ 3D scanner, es va utilitzar l'eina "Sample points" per convertir el mallat en un núvol de punts. Es va haver d'utilitzar aquesta eina perquè el arxiu "vertices" del mallat contenia un gran nombre de punts negres, que es van considerar com soroll (Fig. 34). Aquesta eina va ser de gran ajuda ja que permetia escollir el número exacte de punts que formarien el núvol o, una altra opció era poder triar la densitat del núvol. Un cop feta la conversió ja es va poder utilitzar el núvol de punts per poder analitzar i realitzar les mesures pertinents i comparar amb els altres dos sensors 3D.

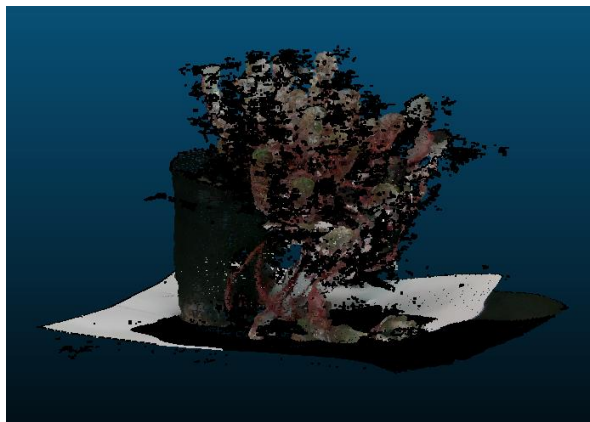


Figura 34.. Arxiu "vertices" del sensor Sense™ 3D scanner

Pels altres dos sensors (Kinect v2 i Intel® RealSense™ Depth Camera D435), la metodologia va consistir en realitzar diferents escanejos de tot el perímetre de la planta i amb el software CloudCompare registrar ("unir") tots els núvols de punts per obtenir el model 3D de la planta escanejada. Es va creure oportú, realitzar només quatre captures del perímetre de la planta, ja que es va intentar registrar un núvol de punts format per una gran quantitat de captures però el núvol quedava imprecís ja que s'havia de realitzar una neteja i depuració de punts important. La clau per poder registrar diversos núvols de punts d'un mateix objecte és disposar de referències en l'escaneig, ja siguin referències damunt l'objecte a escanejar, com ara marcar punts en la superfície de l'objecte, o referències en l'escenari, com col·locar esferes pel voltant de l'objecte a escanejar, un mètode molt utilitzat en el món de l'escaneig 3D.

Es va decidir utilitzar referències en l'escenari per així no haver de marcar cap punt en la superfície de la planta i també evitar haver de rotar la planta per escanejar-la. Com ja s'ha explicat anteriorment, les referències utilitzades van ser esferes (pilotes de pàdel per ser més exactes) que es van disposar pel voltant de tot el perímetre de la planta (Fig. 35), facilitant així la tasca de combinar els diferents núvols de punts i per poder realitzar el modelat 3D en el CloudCompare.



Figura 35. Escenari per al mètode d'escaneig per al sensor d'Intel i Kinect v2

El motiu d'utilitzar esferes com a referència és perquè el software CloudCompare, disposa d'una eina nomenada "Align" (Fig. 36) que permet detectar esferes. Gràcies a aquesta eina tant útil, combinar els núvols de punts va ser una tasca més senzilla. El procediment inclou els següents passos: 1) Primerament s'han de seleccionar els dos núvols de punts a alinear; 2) elegir quin núvol de punts és el de referència; 3) seleccionar l'opció "Spheres"; 4) determinar el radi aproximat (en metres) de les esferes (en el nostre cas un radi de 0.0035 m, mesura oficial de les pilotes de pàdel); 5) establir un error mig (mitja quadràtica: RMS); 6) seleccionar les esferes iguals a cada núvol de punts. D'aquesta manera un algoritme alinea els núvols de punts i de mica en mica s'obté el núvol complet. Per poder realitzar el registre adequadament, es van disposar vuit pilotes pel voltant de la planta. Gràcies al haver tantes referències, per cada captura apareixien mínim quatre pilotes per poder utilitzar com a referència, segons la eina "Align" hi ha d'haver un mínim de tres referències per poder registrar els núvols, per tant, es va aconseguir una millora en la precisió del registre. [25]

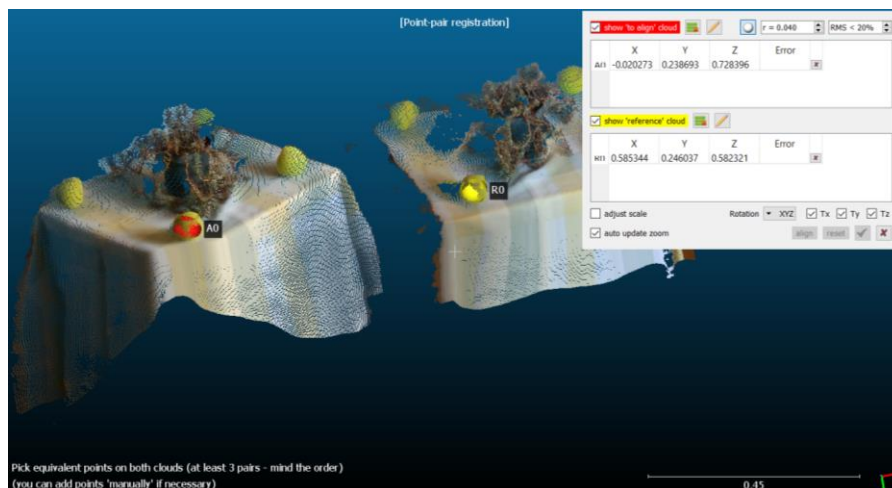



Figura 36. Eina "Align" de CloudCompare


 ESCOLA POLITÀCNICA SUPERIOR UNIVERSITAT DE LLEIDA	Títol: Caracterització tridimensional d'estructures vegetals mitjançant escaneig 3D Autor: Marc Sales Montufo
---	--

3.3.3 Comparació dels diferents sensors 3D

L'objectiu d'aquest treball és comparar els diversos sensors 3D que disposem per poder determinar quina és la millor opció per aplicacions d'agricultura, enginyeria o arquitectura en que es necessiti escanejar estructures vegetals. Per tant, per realitzar aquesta comparació tindrem en compte aspectes com:

- **Versatilitat d'ús del sensor 3D**, ja que aquest tipus de sensors serien de gran utilitat a peu de camp. Per tant, la seva mobilitat i facilitat d'utilització són aspectes a tenir en compte a l'hora d'escollir un sensor.
- **Facilitat d'ús del software** de cada sensor 3D. L'usuari ha de ser capaç de poder manipular de manera senzilla i intuïtiva el software tenint almenys una petita base d'escaneig 3D.
- **Qualitat del núvol de punts** que genera el sensor. Per tal de dur a terme la comparativa tenint en compte els criteris anteriorment descrits, es va dur a terme tot un seguit d'escanejos amb els diversos sensors 3D en diverses situacions diferents:
 - Escanejar amb tan sols llum natural o reforçar la il·luminació amb llum artificial.
 - Comprovar l'exactitud de les distàncies que mesura el sensor 3D amb la realitat.
 - Escanejar en exteriors per comprovar com afecta la llum en els sensors 3D.

D'aquesta forma es va poder avaluar la influència de l'escaneig amb els diferents sensors, en interiors i exteriors, de la il·luminació en espais interiors i de la distància del sensor a l'objecte escanejat.

 ESCOLA POLITÀCNICA SUPERIOR UNIVERSITAT DE LLEIDA	Títol: Caracterització tridimensional d'estructures vegetals mitjançant escaneig 3D Autor: Marc Sales Montufo
---	--

4. Resultats i discussió

En aquest apartat es duu a terme la comparació dels diversos sensors 3D, comparant els aspectes esmentats anteriorment. Només s'exposaran els pros i contres de cada sensor en les diferents situacions d'escaneig. Però primer de tot, s'analitzarà la seva versatilitat i quin dels tres té el software més intuïtiu i fàcil d'utilitzar.

4.1 Versatilitat i facilitat d'ús

Pel que fa a la versatilitat, el sensor que destaca per sobre dels altres és el sensor Intel® RealSense™ Depth Camera D435. És un sensor 3D molt petit i poc pesat, que amb tan sols un USB 3.0 o superior ja es pot començar a escanejar objectes o superfícies.

En canvi, el sensor Kinect v2 és un sensor 3D més gran i pesat, que apart d'un USB 3.0 o superior per funcionar, també necessita d'alimentació, un petit inconvenient a l'hora d'utilitzar aquest sensor 3D a peu de camp, ja que pot reduir la seva mobilitat.

Per últim, el sensor Sense™ 3D scanner podria ser igual de versàtil que el sensor d'Intel però té un inconvenient, només funciona si es connecta a un USB 3.0 i de vegades depenent de la potència l'ordinador no funciona ni amb aquest tipus d'USB.

Un cop analitzada la versatilitat dels tres sensors 3D, es comparen els diferents softwares que hem explicat en apartats anteriors. Es pot afirmar que el software Kinect3D GPS, del sensor Kinect v2 i el software Sense™, del sensor Sense™ 3D scanner, són els softwares més senzills i intuïtius. Pel que fa al sensor 3D Kinect v2, només cal configurar el software tal com s'ha explicat en l'apartat 3.2.2 per poder obtenir l'escaneig desitjat.

El software del sensor Sense™ 3D scanner es caracteritza per ser un software que guia en tot moment a l'usuari per poder realitzar un escaneig i s'evidencia que aquest sensor 3D està pensat per un ús domèstic i familiar.

Per últim, el software Intel® RealSense™ viewer, del sensor Intel® RealSense™ Depth Camera D435 és un software amb milers de possibilitats per poder configurar el sensor 3D on fàcilment et pots perdre, es nota que aquest sensor 3D està pensat per un ús més professional. Tot i la seva complexitat, Intel facilita una guia d'usuari per poder utilitzar correctament aquest software.

4.2 Il·luminació

Un cop feta la comparació de versatilitat i software dels sensors, s'analitzarà la qualitat del núvol de punts que genera cada sensor 3D. Per realitzar aquesta comparació, es realitzaran diferents escanejos com hem indicat anteriorment. Els resultats són els següents.

La il·luminació a l'hora d'escanejar un objecte pot arribar a afectar substancialment la qualitat del núvol de punts resultant. Degut a la seva importància, aquesta va ser la primera situació a comparar entre els tres sensors 3D. El procediment que es va seguir per poder comparar aquets sensors va ser realitzar diferents escanejos amb només llum natural i escanejos reforçant la il·luminació amb llum artificial per cada sensor 3D per finalment comparar quin dels tres obté els millor núvols de punts.

- Llum natural:

Al realitzar els escanejos amb tan sols llum natural, es veu com la il·luminació és irregular per tot el volum de la planta, això fa que apareguin àrees amb menor il·luminació que a l'hora d'escanejar es vegin molt fosques, i àrees sobre il·luminades on es poden veure afectats els colors a l'hora de capturar la planta. A l'hora d'ajuntar els diferents núvols de punts per formar el núvol complet, es pot distingir que, depenen d'on vingui la llum, els colors són més intensos o més foscos. Els escanejos es van realitzar en una habitació on tan sols hi havia una finestra per poder il·luminar l'escenari. També cal destacar que aquests escanejos es van realitzar a ple matí de començaments d'estiu, per tant, el nivell d'il·luminació era alt.

En el cas del sensor 3D Kinect v2 en el núvol de punts, es pot apreciar que per la banda on es projecta la llum, els colors són més intensos i estan més il·luminats, mentre que per les altres orientacions el nivell d'il·luminació és més reduït i els colors que capta el sensor són una mica més foscos. Tot i que la il·luminació en algunes parts de la planta és baixa, la diferència entre els colors de tot el volum és petita (Fig. 37).



Figura 37. Escaneig sensor Kinect v2 amb llum natural

Pel que fa al sensor Sense™ 3D scanner, el núvol de punts obtingut és inferior als altres dos sensors 3D. A simple vista és difícil d'apreciar amb detall la geometria de la planta, més aviat sembla un esbós de l'estructura. Es pot veure en la figura (Fig. 38) com els colors de tot el núvol de punts són més foscos degut a la il·luminació natural i la geometria obtinguda és irregular. Amb aquest núvol de punts és difícil poder obtenir un model tridimensional fidedigne a la realitat, ja que es perd molt detall en les tiges i fulles de la planta. Tot i que el fabricant remarca que és un dels sensors més precisos en el mercat, pel que fa a l'hora d'escanejar plantes el sensor Sense™ 3D scanner no és capaç de poder escanejar amb exactitud.

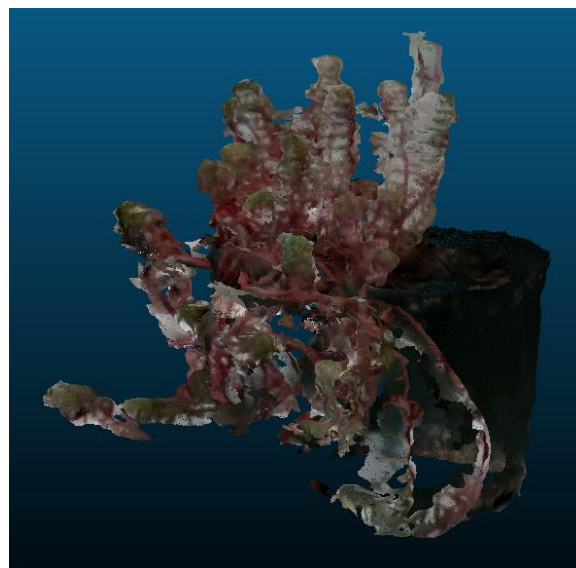


Figura 38. Escaneig sensor Sense™ 3D scanner amb llum natural

Pel que fa al sensor Intel® RealSense™ Depth Camera D435, els colors de tot el perímetre de la planta es veuen afectats significativament, degut a la il·luminació irregular. A l'hora de reconstruir el núvol de punts sencer, sembla que les captures de les diferents orientacions de la planta estiguin captaves amb diferents il·luminacions. En la figura següent (Fig. 39), es poden veure dues orientacions diferents, on depenent d'on vingui la il·luminació, els colors que capta el sensor són ben diferents.

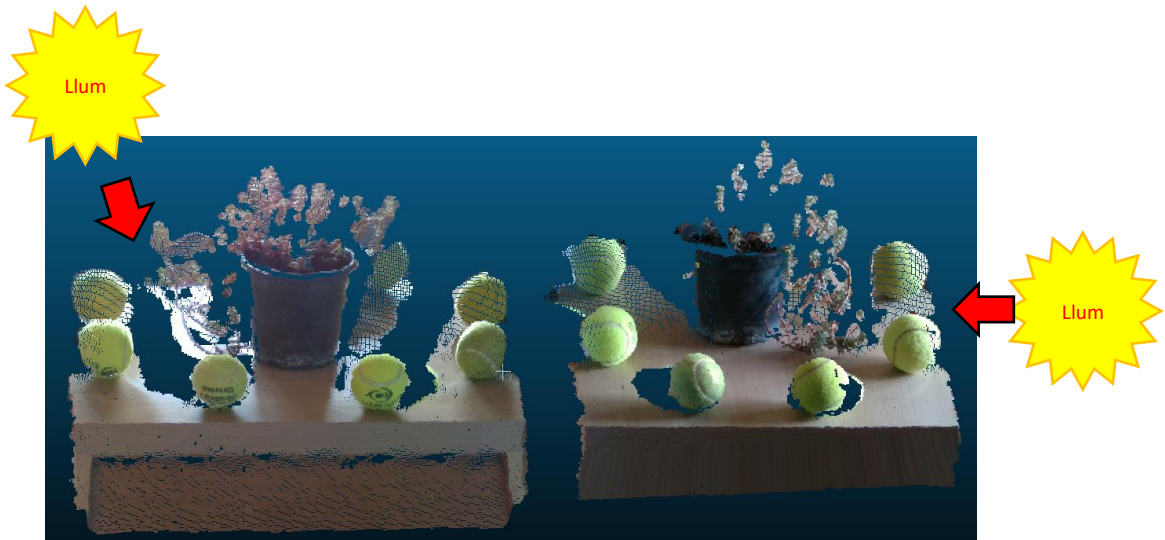


Figura 39. Escanejos del sensor Intel® RealSense™ Depth Camera D435 on es veuen afectats els colors degut a la il·luminació

Tot i així, si no tenim en compte els colors, el núvol de punts que s'obté pel sensor Intel® RealSense™ Depth Camera D435 (Fig. 40) és inferior al mostrat pel sensor Kinect v2. A l'hora de registrar els diversos núvols el resultat no és tan precís, es pot veure perfectament en les pilotes de padel com la geometria és irregular, afectant també al registre de la planta, on hi han parts on no estan ben combinades.

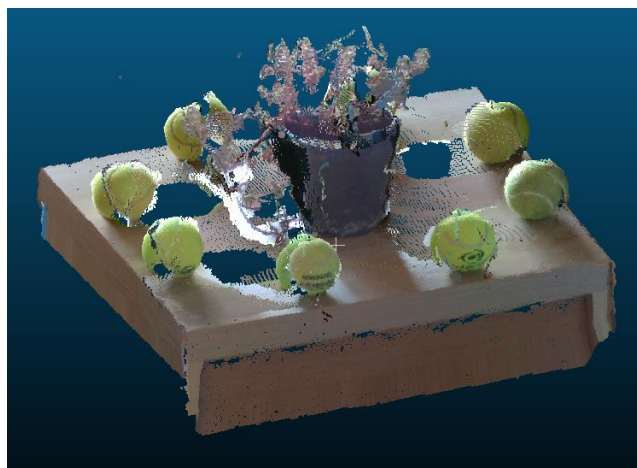


Figura 40. Escaneig sensor Intel® RealSense™ Depth Camera D435 amb llum natural

- Reforçant la il·luminació amb llum artificial:

Al reforçar la il·luminació en l'escenari, es redueixen les ombres que puguin aparèixer, i a més, s'aconsegueix que hi hagi la mateixa intensitat lumínica per tota la superfície de la planta. Gràcies a aquest reforç en la il·luminació, el núvol de punts que es pot obtenir és bastant fidedigne a la realitat, també hi ha una millora substancial a l'hora de realitzar el registre de les diverses captures de tot el volum de la planta i es capten els veritables colors de la planta.

El núvol de punts que s'obté del sensor 3D Kinect v2 (Fig. 41), és bastant millor comparat amb el núvol que s'obté amb tan sols llum natural. En aquest núvol, es pot veure com no apareixen zones sobre il·luminades ni ombres, aconseguint un nivell d'il·luminació pràcticament igual en totes les zones de la planta. Gràcies a aquesta nova il·luminació els colors que capta el mòdul RGB del sensor Kinect v2, són gairebé iguals als de la realitat i a més a més, aquets colors s'aconsegueixen captar en les diverses captures del tot el volum de la planta. Es pot afirmar que per poder obtenir un model tridimensional precís amb el sensor Kinect v2, s'ha de realitzar amb un reforç d'il·luminació artificial.

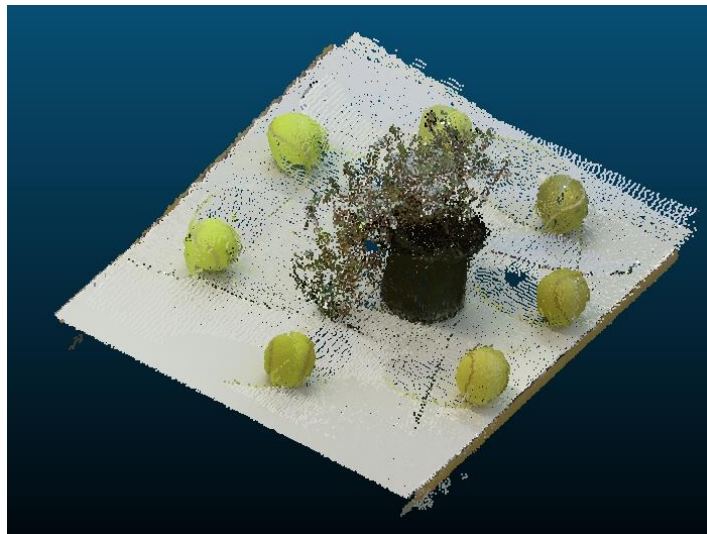


Figura 41. Escaneig sensor Kinect v2 amb reforç en la il·luminació

Pel que fa al sensor Sense™ 3D scanner, en l'escaneig obtingut (Fig. 42) es pot veure la planta ben il·luminada i amb uns colors més clars, tant és així, que per la part de les fulles està sobre il·luminada. Tot i la millora en la il·luminació, la planta queda poc definida amb aquest sensor 3D, sembla que no és capaç de captar detalls tan petits com les tiges i fulles del Sedum. Per tant, podem afirmar que tot i la millora en la il·luminació, els núvols de punts que genera aquest sensor són inferiors als altres dos sensors 3D (Kinect v2 i Intel® RealSense™ Depth

Camera D435) i que aquest sensor 3D no seria una bona elecció per aplicacions de caracterització vegetal.

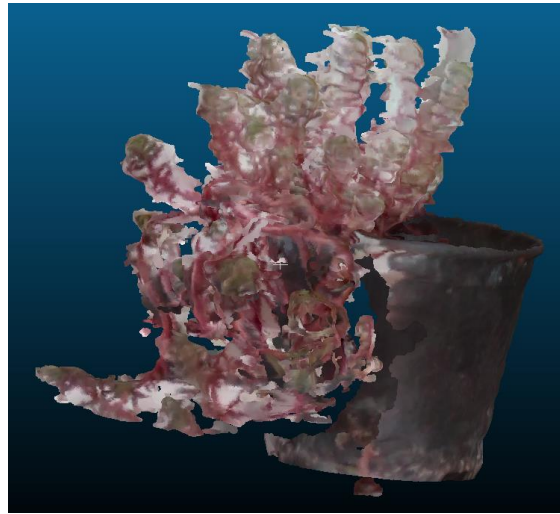


Figura 42. Escaneig sensor Sense™ 3D scanner amb reforç en la il·luminació

Pel que fa al sensor Intel® RealSense™ Depth Camera D435, el núvol de punts (Fig. 43) que s'obté és molt més exacte que el mostrat amb llum natural, en aquest cas, no hi ha una distorsió tan gran entre els colors de les diferents captures del perímetre de la planta. Tot i la millora en el núvol de punts, a l'hora de registrar els diferents núvols, el núvol resultant queda inexacte afectant a la geometria de la planta. Per tant, podem afirmar que el núvol de punts que s'obté amb el sensor Intel® RealSense™ Depth Camera D435 és pitjor al obtingut amb el sensor Kinect v2, però millor que el núvol del sensor Sense™ 3D scanner.



Figura 43. Escaneig sensor Intel® RealSense™ Depth Camera D435 amb reforç en la il·luminació

4.3 Precisió en la mesura de distàncies

El segon aspecte a comparar és l'exactitud que tenen els diferents sensors 3D a l'hora de mesurar distàncies, tret fonamental per poder obtenir un model tridimensional. Per poder realitzar aquesta comparació es van mesurar objectes que apareixien en el núvol de punts, com per exemple, la taula on col·locàvem la planta amb totes les esferes i una capsa on col·locàvem la planta quan s'escanejava amb el sensor Sense™ 3D scanner.

Per realitzar mesures dins dels núvols de punts, es va utilitzar la eina "Point Picking" del software CloudCompare que permet, entre d'altres opcions, escollir dos punts del núvol per mesurar la distància que hi ha entre ells. Totes les mesures realitzades amb aquesta eina, van ser fetes en núvols de punts obtinguts en interiors.

Pel que fa als objectes a mesurar, la taula es caracteritza per tenir una amplada de 50 cm i una profunditat de 41.5 cm, mentre que la capsa es caracteritza per tenir una amplada de 25 cm i una profunditat de 24 cm . Un cop es tenien les mesures reals dels objectes a escanejar, es va calcular l'error que hi havia a l'hora de determinar les distàncies per cada sensor 3D, es van mesurar l'amplada i profunditat dels objectes i es va comparar quin sensor proporcionava mesures més exactes.

- Kinect v2:

El sensor 3D Kinect, es caracteritza per calcular les distàncies a través del principi tecnològic Time of Flight (TOF), principi explicat en l'apartat 2.3.2.1. Les mesures obtingudes per aquest sensor 3D, en metres, són quasi idèntiques a les de la realitat. L'amplada que s'obté del núvol de punts és d'aproximadament 50.03 cm (Fig. 44), es a dir, un error aproximat de 0.06 %.

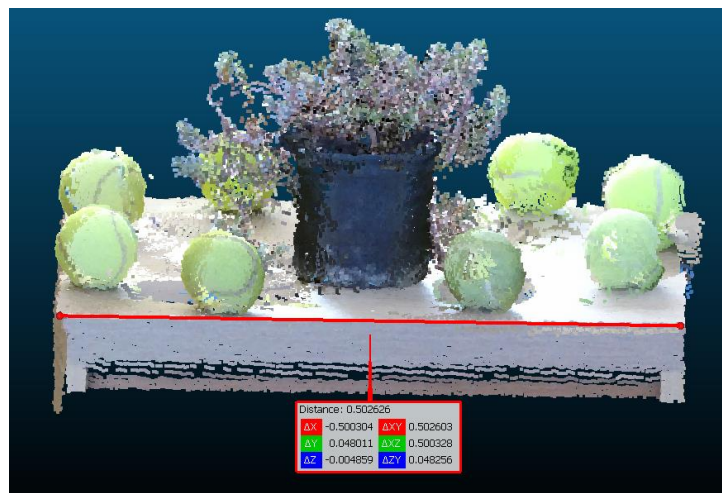


Figura 44. Mesura de l'amplada de la taula amb el sensor Kinect v2

Pel que fa a la profunditat de la taula, amb el sensor Kinect v2 s'obté una profunditat de 41.24 cm (Fig. 45), un error del 0.6 %. Podem afirmar que amb aquest sensor 3D s'obtenen mesures verdaderament exactes. Les mesures obtingudes difereixen com a màxim per mil·límetres, per tant és un sensor a tenir en compte per aquest tipus d'aplicacions en que l'exactitud en les mesures és de vital importància.

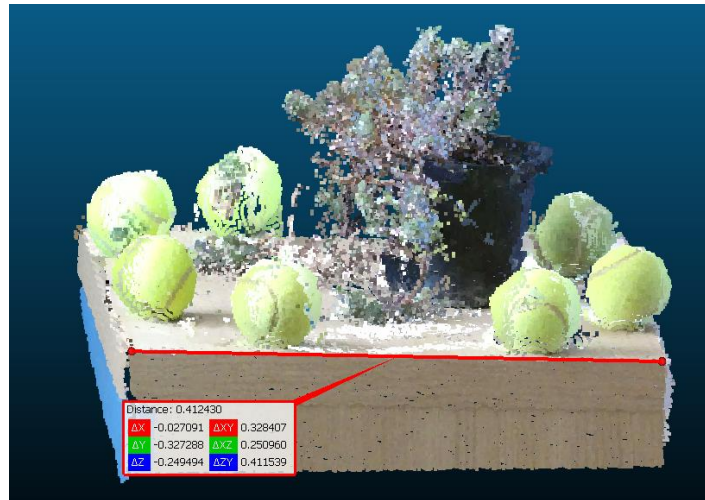


Figura 45. Mesura de la profunditat de la taula amb el sensor Kinect v2

- Intel® RealSense™ Depth Camera D435:

El sensor 3D Intel® RealSense™ Depth Camera D435, es caracteritza per ser un sensor estereoscòpic actiu, es a dir, que té un projector infraroig per calcular les distàncies. Les mesures que obtenim amb aquest sensor 3D, en metres, també són prou bones, una mica inferiors a les del sensor Kinect v2. Pel que fa a l'amplada de la taula, el sensor d'Intel mesura una amplada de 49.03 cm (Fig. 46), un error de 1.94 %.

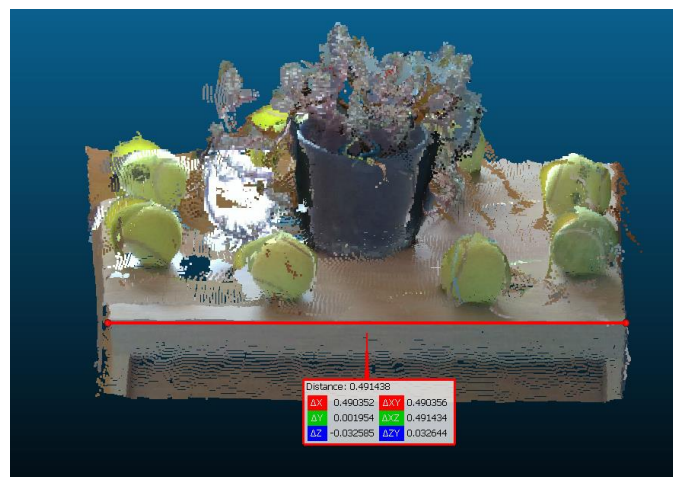


Figura 46. Mesura de l'amplada de la taula amb el sensor d'Intel

La profunditat mesurada pel sensor d'Intel és de 40.38 cm (Fig. 47), un error del 2.69 %. Podem veure amb aquets resultats que el sensor Intel® RealSense™ Depth Camera D435 és també un sensor molt exacte, tot i obtenir resultats inferiors al sensor 3D Kinect v2.

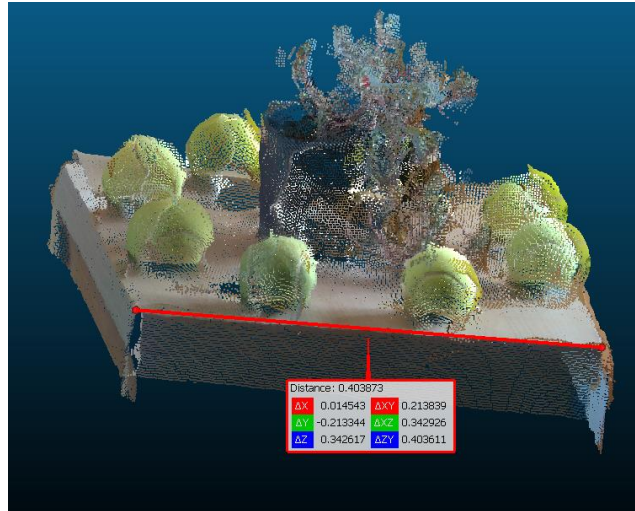


Figura 47. Mesura de la profunditat de la taula amb el sensor d'Intel

- Sense™ 3D scanner:

El sensor Sense™ 3D scanner està basat en el mateix principi tecnològic que la Kinect v2, és un sensor 3D TOF. Al ser un sensor pensat per un rang d'escaneig curt, les mesures que s'obtenen són en mil·límetres. Les mesures que s'obtenen a l'hora de mesurar la capsa són bastant exactes tot i que la qualitat de l'escaneig és inferior als demés sensors 3D. Pel que fa a l'amplada de la capsa, s'obté una amplada de 24.36 cm (Fig. 48), un error del 1.04%.

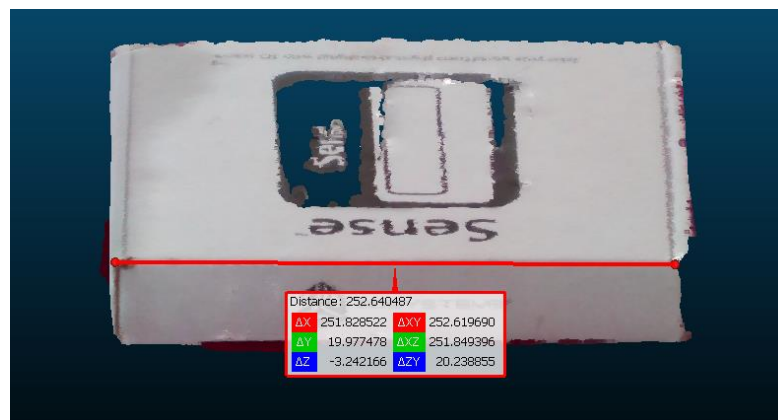


Figura 48. Mesura de l'amplada de la capsa amb el sensor Sense™ 3D scanner

Pel que fa a la profunditat obtinguda, és de 24.36 cm (Fig. 49), un error del 1.5%. Per tant, podem afirmar que el sensor Sense™ 3D scanner s'obtenen núvols de punts qualitativament inferiors però les mesures que realitza són bastant exactes. Aquesta precisió és deguda al principi tecnològic en que està basat aquest sensor 3D ("Time of Flight"), aquest principi tecnològic és un dels més eficients actualment tot i que els sensors 3D per triangulació són els millor valorats a l'hora de realitzar escanejos ben detallats.

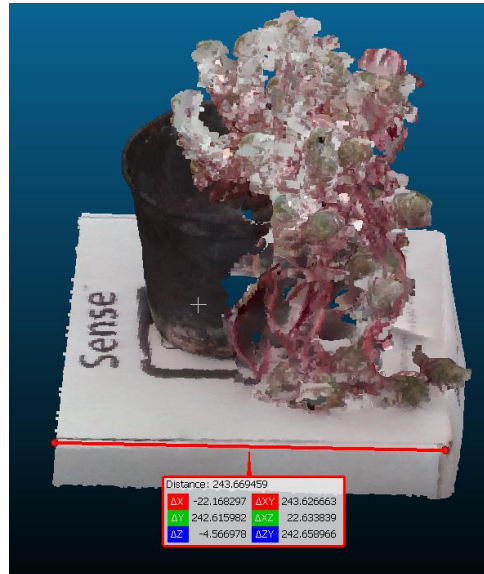


Figura 49. Mesura de la profunditat amb el sensor Sense™ 3D scanner

4.4 Escaneig en exteriors

Per últim, el tercer aspecte a comparar és com es comporten els sensors Kinect v2, Intel® RealSense™ Depth Camera D435 i Sense™ 3D scanner al realitzar escanejos a l'exterior, és a dir en situacions en que el nivell d'il·luminació i radiació és molt elevat. Es va creure oportú realitzar aquesta comparació en l'exterior ja que seria de gran utilitat poder disposar d'un sensor 3D per escanejar plantes a peu de camp i no haver de trasplantar les plantes en testos per traslladar-les a un entorn amb un nivell d'il·luminació més baix.

Els escanejos es van realitzar a principis d'estiu a les 16:00h, és a dir a l'hora en que el sol està més elevat i la intensitat de la llum és major. Primerament es van realitzar diversos escanejos en una àrea en que hi havia ombra i posteriorment es van realitzar en una àrea on tocava tot el sol, d'aquesta manera es va poder realitzar una comparativa més exacta de com afecta la il·luminació a l'hora d'escanejar.

El primer sensor 3D que es va utilitzar per escanejar en l'ombra va ser el sensor Sense™ 3D scanner. Malauradament, aquest sensor no va ser capaç de poder detectar la planta degut a l'alt nivell d'il·luminació de l'escenari. Tan sols era capaç de registrar algun punt del volum de la planta però no tota la geometria, per tant, va ser impossible obtenir qualsevol mena de model tridimensional. Podem afirmar que el sensor Sense™ 3D scanner, no és el sensor 3D indicat per utilitzar-lo en l'exterior o escenaris d'una il·luminació elevada.

El següent sensor 3D que es va utilitzar per escanejar en l'ombra va ser el sensor Kinect v2. Amb aquest sensor 3D si que es van poder realitzar diversos escanejos de tot el volum de la planta. Es va veure que al augmentar el nivell d'il·luminació en l'escaneig, es perdia densitat de punts en el núvol, tot i així, el núvol obtingut pel sensor Kinect v2 presenta una elevada definició, tot i que el fabricant indica que no és un sensor 3D per aplicacions en l'exterior. Com es pot veure en la figura (Fig. 50), la geometria de la planta queda ben definida i els colors captats pel mòdul RGB són prou exactes a la realitat, tot i la il·luminació irregular en algunes zones de la planta.

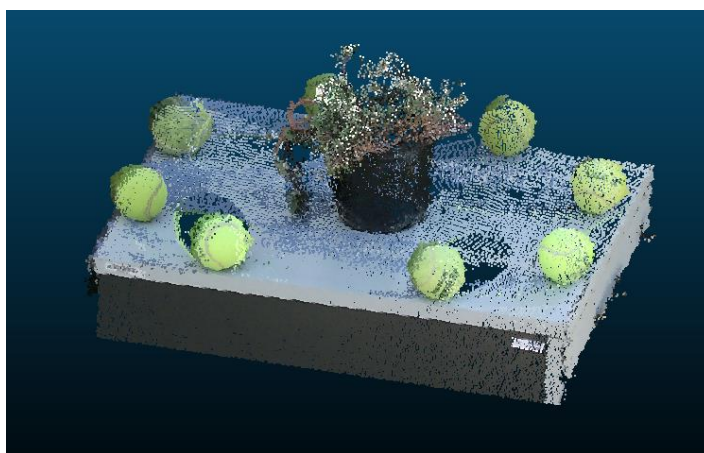


Figura 50. Escaneig amb el sensor Kinect v2 en l'ombra

Finalment l'últim sensor 3D que es va utilitzar per escanejar en l'ombra, va ser el sensor Intel® RealSense™ Depth Camera D435. Aquest sensor 3D, també va experimentar una baixada substancial en nombre de punts del núvol que va generar de l'escenari. Degut aquesta pèrdua, els diferents núvols resultants van ser menys exactes i va ser més difícil registrar-los, ja que algunes de les referències (pilotes de pàdel) que es van col·locar no les va captar correctament. Per tant, el núvol de punts generat va ser bastant imprecís ja que l'algoritme de l'eina "Align" no podia registrar de manera exacta els núvols de punts. Podem afirmar observant la figura (Fig. 51) que el núvol de punts del sensor Intel® RealSense™ Depth Camera D435 és inferior al mostrat anteriorment pel sensor Kinect v2.

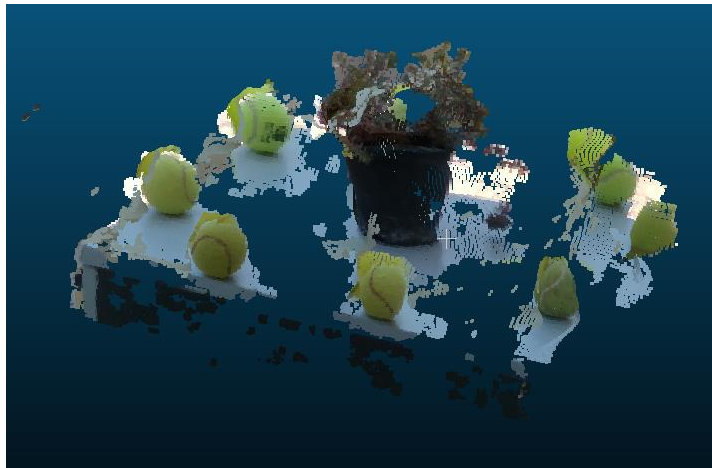


Figura 51. Escaneig amb el sensor Intel® RealSense™ Depth Camera D435 en l'ombra

Un cop es van acabar de relitzar els escanejos en l'ombra es va passar a escanejar a ple sol. Degut que el sensor Sense™ 3D scanner no detectava la planta en l'ombra, es va descartar escanejar amb aquest sensor 3D a ple sol degut a l'alt nivell de radiació directa. Pel que fa al sensor Intel® RealSense™ Depth Camera D435, al haver tingut problemes en l'escaneig en l'ombra es va intentar escanejar a ple sol per comprovar quin podia ser el resultat. Els resultats obtinguts van ser que el sensor d'Intel perdia encara més densitat de punts i feia pràcticament impossible poder registrar els diferents núvols ja que les referències pràcticament no les captava. Com es pot veure en la figura (Fig. 52) el núvol de punts obtingut és encara menys dens que el núvol generat pel propi sensor 3D en l'ombra, tot i que la planta la va poder registrar prou bé. Com es pot veure no hi ha cap esfera en que la geometria hagi quedat ben definida, al no tenir referències no es va poder obtenir un núvol de punts sencer. Per tant podem afirmar que tot i que el fabricant indica que el sensor Intel® RealSense™ Depth Camera D435 és un sensor 3D que es pot utilitzar en exteriors, pel nostre tipus d'aplicacions no resulta adequat.

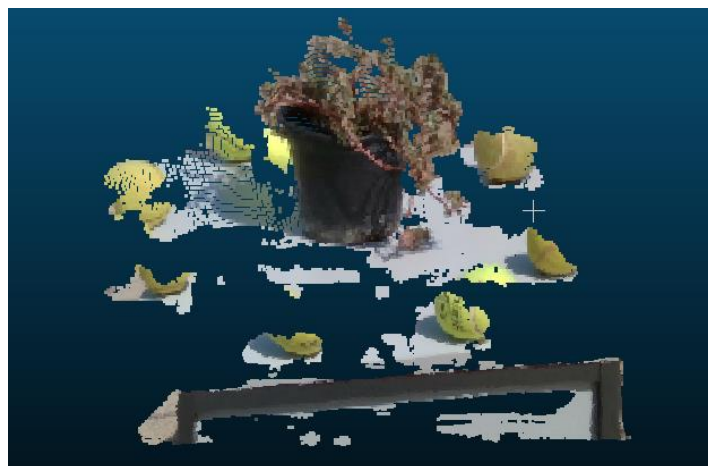


Figura 52. Escaneig amb el sensor Intel® RealSense™ Depth Camera D435 a ple sol



Finalment l'últim sensor 3D que es va utilitzar per escanejar a ple sol va ser el sensor de Microsoft Kinect v2. Tot i l'alt nivell d'il·luminació, aquest sensor va ser capaç d'escanejar tot el volum de la planta, fins i tot les referències, per tant es va poder realitzar el registre de les diferents captures de la planta. El núvol de punts resultant és l'obtingut en la figura (Fig. 53). Es pot observar com, degut al nivell elevat d'il·luminació, la geometria i estructura de la planta queden poc definides i, per tant, escanejar en exteriors no seria la millor opció per poder obtenir un model tridimensional ben exacte. Sorprèn el rendiment de la Kinect v2 en exteriors ja que segons el fabricant i tal com hem explicat en el apartat 3.1.2, aquest sensor no està pensat per aplicacions en l'exterior, més aviat per ambients amb un nivell d'il·luminació baix.

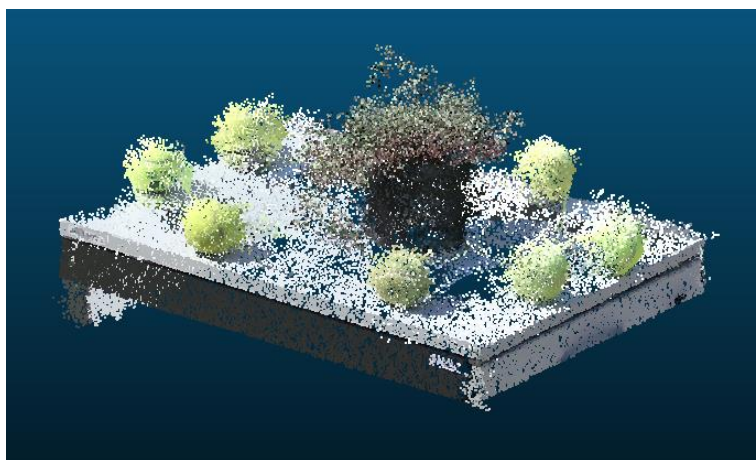


Figura 53. Escaneig amb el sensor Kinect v2 a ple sol


4.5 Comparativa general entre sensors

Un cop analitzats tots els aspectes esmentats anteriorment, es presenta una taula resum (Taula 4) per poder analitzar quin dels tres sensors 3D es va comportar millor en els diferents escenaris analitzats, i per tant el més adequat per a ser emprat amb posterioritat per a la caracterització 3D d'estructures vegetals.

El sensor 3D que va destacar en més categories va ser el sensor Kinect v2. Pràcticament en totes les categories era el millor sensor 3D, excepte en la categoria de versatilitat degut a que es necessita d'alimentació per poder utilitzar el sensor. Però l'aspecte que destaca per sobre dels demés sensors 3D i l'aspecte més important, és la gran qualitat dels núvols de punts que genera, tot i escanejar en situacions d'il·luminació adverses.

Taula 4. Taula comparativa dels diferents sensors 3D

	Kinect v2	Intel® RealSense™ Depth Camera D435	Sense™ 3D scanner
Versatilitat i mobilitat		X	
Software fàcil i intuïtiu			X
Escanejos en interiors amb llum natural	X		
Escanejos en interiors complementant amb llum artificial	X		
Exactitud en mesurar distàncies	X		
Escanejos en exteriors a l'ombra	X		
Escanejos en exteriors a ple sol	X		

 ESCOLA POLITÈCNICA SUPERIOR UNIVERSITAT DE LLEIDA	Títol: Caracterització tridimensional d'estructures vegetals mitjançant escaneig 3D Autor: Marc Sales Montufo
---	--

5. Conclusions


Tal com s'ha explicat en els objectius del treball, emmarcat en un objectiu general en el qual es pretén caracteritzar tridimensionalment estructures vegetals per poder convertir-les en objectes BIM i ser utilitzades en projectes d'arquitectura, més concretament, en construcció sostenible, en aquest treball es presenten els primers passos consistents en determinar quin sensor pot ser el més adient i quina metodologia (establiment de referències, condicions de llum i distàncies d'escaneig, principalment) pot ser la més adequada per a obtenir els núvols de punts de qualitat que permetin dur a terme aquets propòsit.

Així doncs, s'han assolit d'una manera satisfactòria els dos objectius plantejats en l'inici del treball de final de grau (establiment d'una metodologia de treball per a dur a terme els escanejos de les plantes i comparativa de sensors). Pel que fa al primer objectiu, la metodologia d'escaneig de les plantes ha estat basada, en gran part, en la metodologia d'escaneig de vegetació desenvolupada en agricultura de precisió, utilitzant referències externes en l'escenari d'escaneig per poder obtenir un modelat 3D òptim i exacte. Cal destacar que, gràcies a realitzar la comparativa entre sensors 3D, es va poder determinar que les millors condicions a l'hora d'escanejar una estructura vegetal és en interiors amb un reforç en la il·luminació amb llum artificial per poder evitar zones sobre il·luminades o crear ombres.

Pel que fa al segon objectiu, amb els resultats obtinguts en les diverses comparacions, es va determinar que el sensor 3D més indicat per poder realitzar aplicacions d'escaneig d'estructures vegetals és el sensor Kinect v2. Aquest sensor 3D destaca per l'alta qualitat dels núvols de punts que genera independent del nivell d'il·luminació i radiació, tot i que en nivells alts perd la seva precisió. Un altre aspecte que el fa el millor sensor 3D, és l'exactitud a l'hora de realitzar mesures, gràcies a això, amb aquest sensor 3D es poden realitzar models 3D amb més exactitud que altres models en el mercat.

D'aquesta manera es pot concloure que el treball ha estat un èxit, ja que hem complert amb els dos objectius establerts. Tot i això, encara queda investigar en profunditat els núvols de punts obtinguts, ja que l'anàlisi realitzat en aquest treball ha estat de caràcter qualitatiu i a més a més, cal poder determinar com passar els models 3D obtinguts a models BIM per poder ser utilitzats en estudis d'arquitectura.

Fent referència a les conclusions personals, ha estat molt enriquidor descobrir aquest camp de l'enginyeria ja que he pogut expandir els meus coneixements i he descobert un món molt interessant que en un futur no molt llunyà serà de gran importància en molts camps d'investigació o en la vida quotidiana.

 <p>ESCOLA POLITÈCNICA SUPERIOR UNIVERSITAT DE LLEIDA</p>	<p>Títol: Caracterització tridimensional d'estructures vegetals mitjançant escaneig 3D</p> <p>Autor: Marc Sales Montufo</p>
--	---

Bibliografia i web grafia

[1] WEB: Bueno Saber. 3D Laser Historia escáner:

<http://bueno-saber.com/computadoras/escaneres/3d-laser-historia-escaner.php>

(accedit febrer 2019)

[2] WEB: ubiquitous. Historia de escáner láser 3D:

<https://www.ubiquitous.com/KZ5L6BBW/>

(accedit febrer 2019)

[3] WEB: Wikipedia. Escáner 3D:

https://es.wikipedia.org/wiki/Esc%C3%A1ner_3D#Tecnolog%C3%AD

(accedit febrer 2019)

[4] WEB: Instop. Qué es un escáner láser 3D:

<http://blog.instop.es/qu%C3%A9-es-un-escaner-laser-3d>

(accedit febrer 2019)

[5] WEB: Instop. Conceptos básicos de la tecnología LIDAR:

<http://blog.instop.es/qu%C3%A9-es-la-tecnolog%C3%AD>

(accedit febrer 2019)

[6] WEB: Nort3d. Escáner 3D: Tipos y aplicaciones que debes conocer:

<http://nort3d.com/blog/escaner-3d-tipos-y-aplicaciones-que-debes-conocer/>

(accedit març 2019)

[7] WEB: 3dnatives. Escáner de triangulación láser, te lo contamos todo!:

<https://www.3dnatives.com/es/escaner-de-triangulacion-laser-16032016/>

(accedit març 2019)

[8] WEB: Tecnitop. Diferencia de fase:

<https://tecnitop.com/es/diferencia-fase/>

(accedit març 2019)


[9] WEB: Artec3d. Aplicaciones de los escáneres de Artec:

<https://www.artec3d.com/es/cases>

(accedit març 2019)

[10] WEB: Digitalización 3D. Ingeniería inversa de piezas mecánicas:

<https://www.digitalizacion-3d.com/ingenieria-inversa-de-piezas-mecanicas/>

 ESCOLA POLITÀCNICA SUPERIOR UNIVERSITAT DE LLEIDA	Títol: Caracterització tridimensional d'estructures vegetals mitjançant escaneig 3D Autor: Marc Sales Montufo
---	--

(accedit març 2019)

[11] WEB: SICNOVA. El impacto de la impresión 3D en la arquitectura:
<https://sicnova3d.com/blog/el-impacto-de-la-impresion-3d-en-la-arquitectura/>

(accedit abril 2019)

[12] WEB: CADASSHMEIP. El valor Real del escaneo 3D y sus aplicaciones:
<https://www.cadavshmeip.com/escaneo-3d-y-sus-aplicaciones/>

(accedit abril 2019)

[13] WEB: Wikipedia. Intel RealSense:
https://en.wikipedia.org/wiki/Intel_RealSense

(accedit abril 2019)

[14] WEB: Intel RealSense Technology. Intel® RealSense™ Depth Camera D435:
<https://www.intelrealsense.com/depth-camera-d435/>

(accedit abril 2019)

[15] DATASHEET: Intel® RealSense™ D400 Series (DS5) Product Family.

(accedit abril 2019)

[16] WEB: Intel RealSense. Store Intel® RealSense™ Depth Camera D435:
<https://click.intel.com/intelr-realsensetm-depth-camera-d435-30-pack.html>

(accedit abril 2019)

[17] ARTICLE CIENTÍFIC: Elise Lachat, Hélène Macher, Tania Landes i Pierre Grussenmeyer (2015). Assessment and Calibration of a RGB-D Camera (Kinect v2 Sensor) Towards a Potential Use for Close-Range 3D Modeling. Remote Sensing 2015, 7, 13070-13097. DOI: 10.3390/rs71013070.


(accedit abril 2019)

[18] WEB: Kinect for developers. Características Kinect 2.
<http://www.kinectfordevelopers.com/es/2014/01/28/caracteristicas-kinect-2/>

(accedit maig 2019)

[19] ARTICLE CIENTÍFIC: Joan R. Rosell-Polo, Eduard Gregorio, Jordi Gené, Jordi Llorens, Xavier Torrent, Jaume Arnó, Alexandre Escolà (2016). Kinect v2 Sensor-based Mobile Terrestrial Laser Scanner for Agricultural Outdoor Applications. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 22(6), 2420-2427. DOI: 10.1109/TMECH.2017.2663436.

(accedit maig 2019)

 <p>ESCOLA POLITÀCNICA SUPERIOR UNIVERSITAT DE LLEIDA</p>	<p>Títol: Caracterització tridimensional d'estructures vegetals mitjançant escaneig 3D</p> <p>Autor: Marc Sales Montufo</p>
--	---

[20] WEB: 3D Systems. Sense Scanner:

<https://www.3dsystems.com/3d-scanners/sense-scanner>

(accedit maig 2019)

[21] WEB: 3D Systems. Sense 3D scanner, tech specs:

<https://www.3dsystems.com/shop/sense/techspecs>

(accedit maig 2019)

[22] WEB: Software Intel. Intel® RealSense™ SDK 2.0:

<https://software.intel.com/en-us/realsense/sdk>

(accedit maig 2019)

[23] WEB: GitHub. Depth quality tool:

<https://github.com/IntelRealSense/librealsense/tree/master/tools/depth-quality>

(accedit maig 2019)

[24] WEB: DigitalHeritage. CloudCompare, anàlisi de nubes de punts para fotogrametria:

<http://www.ipereira.net/software-revisiones-y-consejos/cloudcompare-analisis-de-nubes-de-puntos-para-fotogrametria>

(accedit maig 2019)

[25] WEB: CloudCompare. Introduction:

<https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php?title=Introduction>

(accedit maig 2019)

[26] WEB: CloudCompare. Align:

<https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php?title=Align>

(accedit juny 2019)